

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Моделирование узла формирования пучка нейтронов для мониторинга влажности почвы</b>

УДК 539.171.4:631.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Кусков Владислав Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Беденко С. В.	к. ф.-м. н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОГСН ШБИП	Киселева Е. С.	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к. ф.-м. н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.03.02. Ядерные физика и технологии	Бычков П. Н.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и

	другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и

	протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Бычков П. Н.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОА6В	Кусков Владислав Андреевич

Тема работы:

Моделирование узла формирования пучка нейтронов для мониторинга влажности почвы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	– Материальный состав Am-Be источника; – рекомендованный спектр Am-Be источника.
--	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>– Исследование радиационных характеристик AmBe источника нейтронов;</p> <p>– создание реалистичной и расчетной моделей установки по определению влагосодержания грунта;</p> <p>– расчет переноса нейтронов в системе;</p> <p>– сравнение полученных результатов с точечной моделью.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>– Рассчитанный спектр нейтронов AmBe источника в сравнении с экспериментальным;</p> <p>– Сравнение углового рассеяния нейтронов точечной модели и модели реальной геометрии</p> <p>– Сборочный чертеж узла формирования нейтронного пучка</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Обзор литературы	Беденко Сергей Владимирович
Расчетная часть	Беденко Сергей Владимирович
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Финансовый менеджмент	Киселева Елена Станиславовна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**


Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ	Беденко С. В.	к.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОА6В	Кусков Владислав Андреевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Кускову Владиславу Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02

Тема ВКР:

Моделирование узла формирования пучка нейтронов для мониторинга влажности почвы	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Моделирование узла формирования пучка нейтронов для мониторинга влажности почвы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ–99/2009;</li> <li>– СП 2.6.1.2612-10;</li> <li>– ГОСТ Р 22.11.01-2014;</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ионизирующее излучение;</li> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– превышение уровня шума;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений;</li> <li>– электрический ток.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта исследования на окружающую среду;</li> <li>– защита окружающей среды.</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– радиационная авария;</li> <li>– анализ типичной ЧС - пожар в рабочем помещении.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Кусков Владислав Андреевич		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Кускову Владиславу Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– 30% премии; 20% надбавки; 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 % – Ставка по НДС – 20%.

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	– Провести SWOT-анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	– Выявить структуру работ и их исполнителей; – определить трудоемкость проводимых работ; – разработать график проведения исследования (диаграмма Ганта); – рассчитать размер бюджета исследования.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка экономической эффективности проекта

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка услуг по определению влаigosодержания
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT-анализа
4. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОГСН ШБИП	Киселева Е. С.	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Кусков Владислав Андреевич		



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования Бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Отделения ядерно-топливного цикла

Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
02.03.2020	Выдача задания	
04.03.2020	Анализ тематической литературы	
15.03.2020	Нейтронно-физический расчет	
03.04.2020	Анализ полученных результатов	
27.04.2020	Сдача работы	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Беденко С. В.	к. ф.-м. н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.03.02 Ядерные физика и технологии	Бычков П. Н.	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 91 с., 24 рис., 23 табл., 38 источников, 2 прил.

Ключевые слова: влажность почвы, Am-Be источник, рассеяние нейтронов.

Объектом исследования является лабораторная система по определению влажности почвы.

Цель работы – продемонстрировать применимость метода определения влажности почвы с помощью регистрации рассеянных нейтронов с учетом реальных размеров коллиматора и геометрии источника нейтронов.

В процессе исследования проводились расчет радиационных характеристик Am-Be источника, расчет переноса нейтронов с помощью расчетной модели установки по определению влажности почвы.

В результате исследования представлено техническое обоснование применимости метода определения влажности почвы с помощью регистрации углового распределения рассеянных нейтронов, произведена оценка влияния на результаты расчетов (регистрируемое угловое распределение нейтронов) нейтронов, рассеянных от элементов конструкции установки.

Область применения: сельское хозяйство, лесное хозяйство, строительство, горнодобывающая промышленность.

В будущем планируется создание реальной лабораторной установки для определения влажности почвы, проведение ряда экспериментов по определению зависимости скорости счета нейтронов системой детекторов и влажностью почвы, сравнительный анализ полученных результатов эксперимента и результатов расчета настоящей работы.

## Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы .....	16
1.1 Модель замедления .....	16
1.2 Модель диффузии нейтронов .....	20
1.3 Нейтронное излучение для определения влажности почвы .....	24
2 Расчетная часть.....	28
2.1 Источник нейтронов .....	28
2.1.1 Компоновка источника .....	28
2.1.2 Спектр AmBe источника .....	31
2.2 Система по определению влажности почвы .....	38
2.2.1 Установка по исследованию влагосодержания почвы.....	38
2.2.2 Материалы и методы моделирования .....	40
2.2.3 Результаты моделирования .....	44
3 Социальная ответственность.....	48
3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	48
3.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	48
3.1.2 Организация рабочего места исследователя .....	50
3.2 Производственная безопасность.....	51
3.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования .....	51
3.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в процессе исследования.....	52

3.2.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя .....	54
3.3 Экологическая безопасность.....	56
3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	58
3.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	58
3.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	58
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	61
4.1 Организация и планирование работ .....	61
4.2 Продолжительность этапов работ .....	62
4.3 Потенциальные потребители результатов исследования .....	65
4.4 Анализ конкурентных технических решений .....	66
4.5 SWOT-анализ.....	67
4.6 Расчет накопления готовности работы .....	70
4.7 Расчет сметы на выполнение проекта.....	71
4.7.1 Расчет затрат на материалы .....	72
4.7.2 Расчет заработной платы.....	73
4.7.3 Расчет затрат на страховые взносы .....	74
4.7.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	74
4.7.5 Расчет амортизационных расходов .....	75
4.7.6 Расчет прочих расходов.....	76
4.7.7 Расчет суммарной себестоимости разработки .....	77
Заключение .....	79
Список используемых источников.....	80

Приложение А .....	84
Приложение Б .....	90

## Введение

Определение влажности почвы имеет важное значение в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве, строительстве, добывающей промышленности и многих других областях человеческой деятельности. Кроме того, содержание влаги в общем случае не является постоянной величиной – в результате постоянного обмена водой между почвой, атмосферой, растительностью и т.д. влажность почвы меняется. Поэтому, одноразового измерения влажности недостаточно, необходим постоянный во времени мониторинг. Современные методы мониторинга такие как метод диэлектрической проницаемости, тензиометрический метод, рефлектометрический, гаммоскопический, нейтронный и, ставший уже классическим, гравиметрический метод успешно применяются в полевых и лабораторных условиях.

Нейтронный метод основан на регистрации рассеянных нейтронов, предложенный еще в 1960 году, разработка которого продолжается в настоящий момент. К настоящему моменту, группой иранских исследователей предложен новый подход к определению влажности почвы, который заключается в регистрации углового распределения рассеянных почвой нейтронов непосредственно на поверхности почвы. Однако, при моделировании переноса нейтронов авторы ограничились следующим приближением: размеры коллиматора и Am-Be источника нейтронов являются точечными; модель не учитывает влияние размеров коллиматора, элементов конструкции и защитных экранов установки на угловое распределение рассеянных от образца почвы нейтронов.

В связи с этим, цель данной работы: продемонстрировать возможность предложенного ранее метода определения влажности почвы с учетом реальных размеров коллиматора и геометрии источника нейтронов.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор литературы по теории переноса нейтронов и ее приложение в определении влагосодержания грунта;
- исследовать радиационные характеристики AmBe источника;
- создать расчётную модель, учитывающую размеры источника, коллиматора и конструктивных элементов установки;
- выполнить моделирование переноса нейтронов в предлагаемой установке;
- выполнить сравнительный анализ точечной и реальной геометрии установки.

## 1 Обзор литературы

Пространственное распределение нейтронов описывается кинетическим уравнением:

$$n = f(r, \Omega, E, t). \quad (1)$$

Где  $n$  – концентрация (или количество) нейтронов в элементарном объеме,  $r$  – радиус-вектор до элементарного объема,  $\Omega$  – направление скорости движения нейтронов в элементарном объеме,  $E$  – энергия нейтронов,  $t$  – время, т.е. в общем случае решается нестационарная задача. Решение такого уравнения сложная задача, требующая использования прецизионных методов, таких, например, как используемый в настоящей работе метод Монте-Карло [1]. Однако для представления распространения нейтронов используются аналитические модели рассеяния и диффузии нейтронов.

### 1.1 Модель замедления

В общем случае, замедление нейтронов происходит при упругом сферически-симметричном рассеянии нейтронов на ядрах среды. Капсульные источники нейтронов, один из которых используется в данной работе, являются источниками быстрых нейтронов, то есть энергия излучаемых нейтронов значительно превосходит тепловую энергию движения ядер среды ( $\sim 1$  эВ), таким образом справедливо приближение неподвижности ядер среды в акте рассеяния. Решением задачи рассеяния, широко используемой в экспериментальной физике (модель рассеяния Резерфорда), статистической физике и т.д., является соотношение энергии, теряемой частицей в акте рассеяния, и углом рассеяния. Такое соотношение определяется с помощью законов сохранения энергии и импульса до и после акта рассеяния:

$$\begin{cases} \vec{p}_n = \vec{p}'_n + \vec{p}'_A, \\ T_n = T'_n + T'_A \end{cases}, \quad (2)$$



где  $p_n, p'_n$  – импульс нейтрона до и после столкновения;  $T_n, T'_n$  – кинетическая энергия нейтрона до и после столкновения;  $p'_A, T'_A$  – импульс и кинетическая энергия отдачи ядра массы  $A$  (т.е. с массовым числом  $A$ ) после акта рассеяния.

Основной подход к решению такой задачи сводится к рассмотрению задачи в системе координат, связанной с центром инерции нейтрона с ядром (С-система), после чего осуществляется переход в лабораторную систему координат (L-система) (см. рисунок 1) [2].

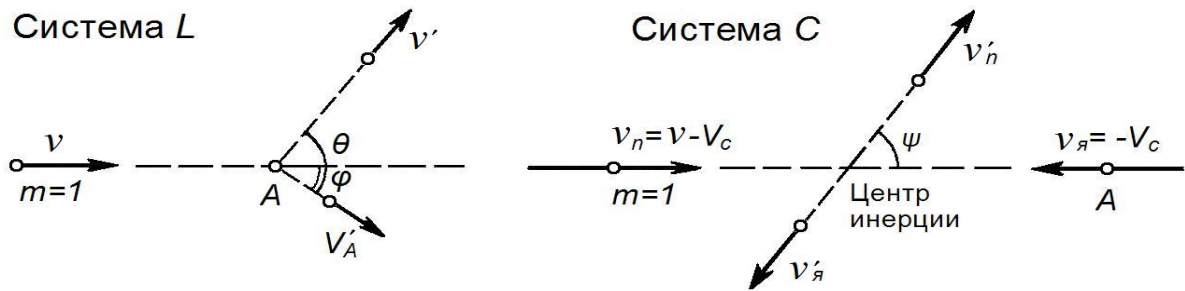


Рисунок 1 – Столкновение нейтрона с ядром в L- и С-системе

Рассмотрим задачу в С-системе. По определению в системе центра масс суммарный импульс нейтрона и ядра равен нулю до и после столкновения. Тогда закон сохранения импульса в С-системе запишется следующим образом:

$$v - V_C = AV_C, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость нейтрона в L-системе до столкновения,  $V_C$  – скорость С-системы относительно L-системы,  $A$  – масса ядра, масса нейтрона в данной задаче принята равной 1. Согласно выражению (2):

$$V_C = \frac{v}{A+1}. \quad (4)$$

Пусть  $v_n, v_A, v'_n, v'_A$  – скорости нейтрона и ядра  $A$  до и после рассеяния в С-системе. Тогда скорость нейтрона в С-системе, с учетом (4), можно выразить как:

$$v_n = v - V_C = v - \frac{v}{A+1} = \frac{Av}{A+1}. \quad (5)$$

С другой стороны, согласно закону сохранения импульса, в С-системе:

$$v'_n = Av'_A. \quad (6)$$

Закон сохранения энергии в С-системе, опуская множитель 1/2, примет вид:

$$v_n^2 + AV_C^2 = (v'_n)^2 + A(v'_A)^2. \quad (7)$$

С учетом выражений (4) и (5), скорости ядра и нейтронов после столкновения:

$$\begin{aligned} v'_A &= \frac{v}{A+1}, \\ v'_n &= \frac{Av}{A+1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Возвращаясь к L-системе, скорость нейтрона после столкновения:

$$\vec{v}' = \vec{v}'_n + \vec{V}_C. \quad (9)$$

По теореме косинусов, согласно рисунку 1, имеем:

$$(v')^2 = V_C^2 + (v'_n)^2 - 2V_C v'_n \cdot \cos(\pi - \psi). \quad (10)$$

Подставляя уже найденные в С-системе  $V_C$  и  $v'_n$  в выражение (9), получим:

$$\left(\frac{v'}{v}\right)^2 = \frac{T'_n}{T_n} = \frac{A^2 + 2A \cos \psi + 1}{(A+1)^2}. \quad (11)$$

Чтобы окончательно осуществить переход в лабораторную систему координат, нужно установить связь между  $\psi$  и  $\theta$  (угол в L-системе). Она имеет вид:

$$\cos \theta = \frac{v}{v'} \cdot \frac{A \cdot \cos \psi + 1}{A+1} = \frac{A \cdot \cos \psi + 1}{\sqrt{A^2 + 2A \cdot \cos \psi + 1}}. \quad (12)$$

Окончательно, закон замедления нейтрона в акте рассеяния примет вид:

$$\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{T'_n}{T_n}} = \frac{1}{A+1} \left[ \cos \theta + \sqrt{(\cos^2 \theta + A^2 - 1)} \right]. \quad (13)$$

Пусть нейтрон с энергией  $T_n$  рассеивается на ядре массой  $A$ . Тогда в крайних случаях нейтрон может рассеяться на угол:

–  $\theta = 0$  (скользящий удар),  $T'_n = T_n$ , в этом случае энергия нейтрона после рассеяния  $T'_n$  будет максимальной и практически равной энергии до рассеяния;

–  $\Theta = \pi$  (лобовое столкновение),  $T'_n = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 T_n$ , в этом случае энергия нейтрона после рассеяния будет минимальной. На рисунке 2 представлены относительные потери энергии при рассеянии нейтрона на ядрах различной массы  $A$  от угла рассеяния для различных легких ядер, используемых в качестве замедлителей в ядерных реакторах.

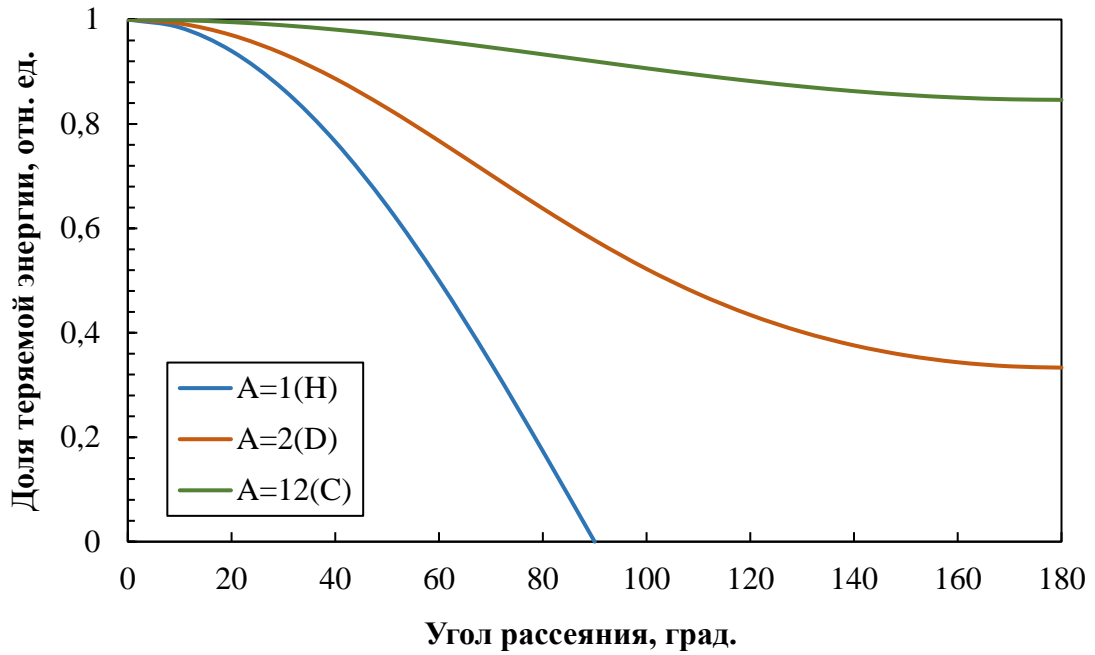


Рисунок 2 – Доля потери энергии нейтрона на ядре при различном угле рассеяния

Параметр:

$$\varepsilon = \frac{T'_{\min}}{T'_{\max}} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2, \quad (14)$$

характеризует максимальную долю энергии, теряемую нейтроном при рассеянии. Рассмотрим максимальную энергию при рассеянии, с учетом (14):

$$\Delta T_{\max} = T'_{\max} - T'_{\min} = T_n - \varepsilon T_n = T_n(1 - \varepsilon), \quad (15)$$

Относительная потеря энергии нейтроном:

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_n} = 1 - \varepsilon = \frac{4A}{(A+1)^2}. \quad (16)$$

Таким образом, анализируя выражение (16), можно прийти к выводу, что при столкновении с ядром массой  $A = 1$ , т.е. ядром водорода  $H^1$ , нейтрон теряет до 100% своей первоначальной энергии (при лобовом столкновении).

Таким образом, при повышении доли воды в почве, нейтроны будут эффективнее замедляться, т.е. большее количество нейтронов замедлится до тепловой области, следовательно, возрастет скорость счета детекторов.

## 1.2 Модель диффузии нейтронов

Явление диффузии известно из кинетической теории газов. В общем случае, диффузия – процесс переноса частиц в веществе (твердом, жидком, газообразном), обусловленный тепловым движением и наличием градиента концентрации частиц. Диффузионная модель переноса нейтронов широко применяется в нейтронной физике, однако в отличие от классической диффузии, модель диффузии нейтронов применяется не только к тепловым нейтронам (которые находятся в термодинамическом равновесии со средой), но и к надтепловым нейтронам, по средством разбиения спектра нейтронов на квазимоноэнергетические группы. Таким образом, для описания движения нейтронов группы выделяется средний нейтрон, параметры которого (кинетическая энергия, пробеги и т.д.) распространяются на всю группу.

Диффузия нейтронов обусловлена многократным изменением направлением движения и скорости нейтронов в веществе в результате столкновений с ядрами среды. В модели диффузии нейтронов применяются некоторые приближения:

- Замедление нейтронов внутри группы происходит за счет упругих столкновений с ядрами замедлителя (малые потери энергии). Неупругим соударением можно пренебречь. При этом средний нейтрон группы практически не изменяет своей энергии;

- В рамках диффузионного приближения нейтроны рассеиваются сферически симметрично, т.е. равновероятно в угол  $4\pi$ .

Применение таких приближений позволяет упростить кинетическое уравнение (1) до  $n = f(r, t)$ , для выделенной группы нейтронов энергии  $E$ .

Основной величиной, применяемой для описания транспорта нейтронов, является плотность потока нейтронов, которая в общем случае определяется как произведение концентрации нейтронов в элементарном объеме  $n(r, t)$  на скорость движения нейтронов в среде  $v$ :

$$\Phi(r, t) = n(r, t) \cdot v. \quad (17)$$

Диффузия нейтронов носит статистический характер, поэтому для ее описания оперируют усредненными параметрами, такими как макроскопическое сечение взаимодействия  $\Sigma$  – вероятность взаимодействия нейтрона с ядрами веществ на единице длины его пути, проходимого в веществе,  $\text{см}^{-1}$ , т.е. макроскопическое сечение является обратной величиной к пробегу нейтрона в среде  $\lambda$ . Наиболее важные для описания диффузии нейтронов в неразмножающей среде являются сечения поглощения ( $\Sigma_a$ ) и рассеяния ( $\Sigma_s$ ), последние делится на упругое и неупругое. Большинство реальных сред являются анизотропными (рисунок 2), т.е. рассеяние нейтронов в них происходит несимметрично, особенно анизотропия прослеживается для сред, состоящих из легких ядер.

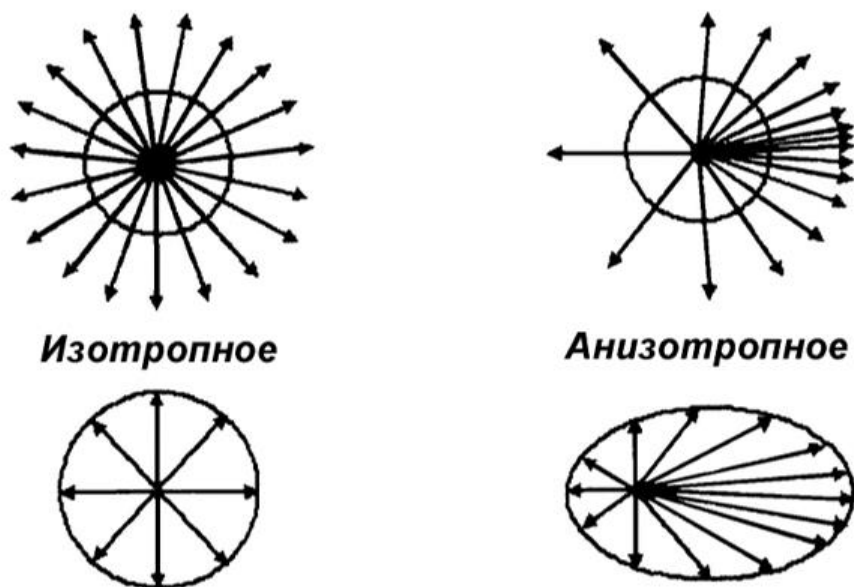


Рисунок 2 – Изотропное и анизотропное рассеяния

Диффузионное приближение о сферически симметричном рассеянии в таком случае может быть описано введением транспортных параметров. Транспортные параметры вводятся путем усреднения анизотропии по всем направлениям (см. рисунок 2), математически такое усреднение описывается с помощью среднего косинуса угла рассеяния  $\overline{\cos \theta}$ :

$$\lambda_{trs} = \frac{\lambda_s}{1 - \overline{\cos \theta}}, \quad (18)$$

здесь  $\lambda_s$  – пробег нейтрона до рассеяния,  $\lambda_{str}$  – транспортный пробег нейтрона до рассеяния.

Баланс нейтронов в неразмножающей среде в общем случае может быть описан эффектами утечки, поглощения нейтронов в среде, а также прибылью нейтронов от внешнего источника. Опуская довольно сложные математические выкладки [2], уравнение баланса нейтронов примет вид:

$$\frac{dn(r,t)}{dt} = \frac{d\Phi(r,t)}{v \cdot dt} = S(r,t) + \nabla(D(r) \cdot \Phi(r,t) - \Sigma_a(r)\Phi(r,t)), \quad (19)$$

где  $S(r,t)$  – мощность внешнего источника нейтронов;  $D(r)$  – коэффициент диффузии нейтронов,  $D(r)$  имеет аналогичный физический смысл, что и в термодинамике и определяется как  $D(r) = 1/3\Sigma_{tr} = \lambda_{tr}/3$ .

Для гомогенных сред, какой в частности является почва, параметры не зависят от пространственной координаты и являются одинаковыми во всех точках среды. Тогда для почвы выражение (19) можно упростить:

$$\frac{d\Phi(r,t)}{v \cdot dt} = S(r,t) + D\Delta\Phi(r,t) - \Sigma_a\Phi(r,t). \quad (20)$$

В качестве источника  $S(r,t)$  в поставленной задаче по определению влажности почвы выступает направленный пучок нейтронов имеющий некоторый угол. Задачу можно упростить, рассмотрев установившийся режим, когда концентрация нейтронов в почве выходит в стационар, тогда в качестве источника можно принять объем почвы с гомогенно распределенными нейтронами:

$$S(r,t) + D\Delta\Phi(r,t) - \Sigma_a\Phi(r,t) = 0. \quad (21)$$

Однако, в данной работе предполагается использовать радиоизотопный источник нейтронов, такие источники имеют сложный спектр, который зависит как от материального состава, так и от конфигурации элементов внутри источника. Таким образом, уравнение баланса нейтронов в почве несколько усложняется, его описание схематически представлено на рисунке 3.

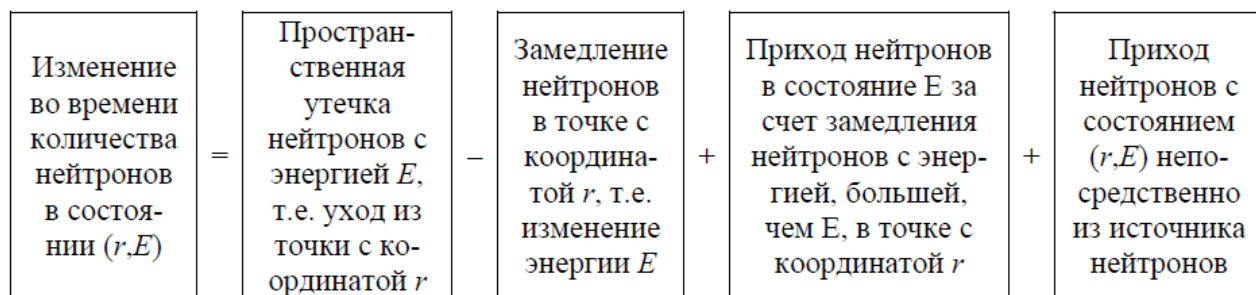


Рисунок 3 – Баланс немонотонных нейтронов в среде

Математическая схема, изображенная на рисунке 3, описывается следующим образом [2]:

$$D(E)\Delta\Phi(r,E) - \Sigma_t(E)\Phi(r,E) + \int_E^{E_{\max}} \Sigma_s(E')W(E' \rightarrow E)\Phi(r,E')dE' + S(r,E) = 0, \quad (22)$$

где  $\Sigma_t(E)$  – полное макросечение взаимодействия с ядрами среды;  $W(E' \rightarrow E)$  – вероятность для нейтрона энергии  $E'$  замедлится до энергии  $E$  в результате упругих и неупругих столкновений с ядрами среды,  $E_{\max}$  – максимальная энергия нейтронов источника. Уравнение (22) решается с помощью использования прецизионных компьютерных программ, например, реализующих расчет методом Монте-Карло.

Таким образом, наличие в почве ядер водорода, которые входят в состав молекулы воды, приводит к увеличению доли термализованных нейтронов при облучении почвы, соответственно при повышении влажности, доля тепловых нейтронов также растет. Однако, водород обладает относительно высоким сечением поглощения тепловых нейтронов, следовательно, при повышении влажности часть тепловых нейтронов теряется. В результате термализации нейтронов в почве, происходит накопление тепловых нейтронов в почве, соответственно концентрация их растет. С определенного момента возникает

градиент концентрации между почвой и окружающим воздушным пространством, в результате чего нейтроны начинают диффундировать в воздухе, система детекторов регистрирует угловое распределение таких нейтронов, на этом и основан предлагаемый метод мониторинга влажности почвы.

### **1.3 Нейтронное излучение для определения влажности почвы**

Как уже было описано выше, термализованные и рассеянные быстрые нейтроны могут быть использованы для исследования влажности почвы, при повышении влажности почвы возрастает число зарегистрированных тепловых нейтронов, т.к. увеличивается доля тепловых нейтронов в почве. Впервые эксперимент по применению нейтронов для определения влажности почвы был поставлен 70 лет назад [3], однако с тех пор работы в этой области публиковались не так активно. Суть эксперимента заключается в размещении радиоизотопного источника нейтронов под землю, в то время как на поверхности почвы (или на меньшей глубине) располагаются детекторы нейтронов. В результате переноса в почве, нейтроны замедляются и тепловые нейтроны регистрируются детекторами.

В научной периодике существует еще ряд подобных работ, постановка эксперимента в них практически не отличается от оригинальной работы. Однако, существенным является глубина погружения источник, а в общем случае, и расстояние от источника до детектора. В работе [4] авторы предложили использовать два детекторы расположенных на разных расстояниях от источника (ближний и дальний), в результате анализ о влажности почвы проводился на основе отношения скоростей счета двух нейтронов, которое предполагается линейно-зависимым от влажности почвы. Для постановки такого эксперимента была разработана компьютерная модель, с помощью программы MCNPX2.6 система была промоделирована с различной глубиной погружения источника, с целью определения оптимальной глубины погружения источника, в результате моделирования выбрана глубина в 197 мм, что соответствует 83,72



кг сухой почвы. Результаты эксперимента представлены на рисунке 4, на каждом шаге сухая почва смешивалась с водой, т.е. влажность почвы увеличивалась на 5%.

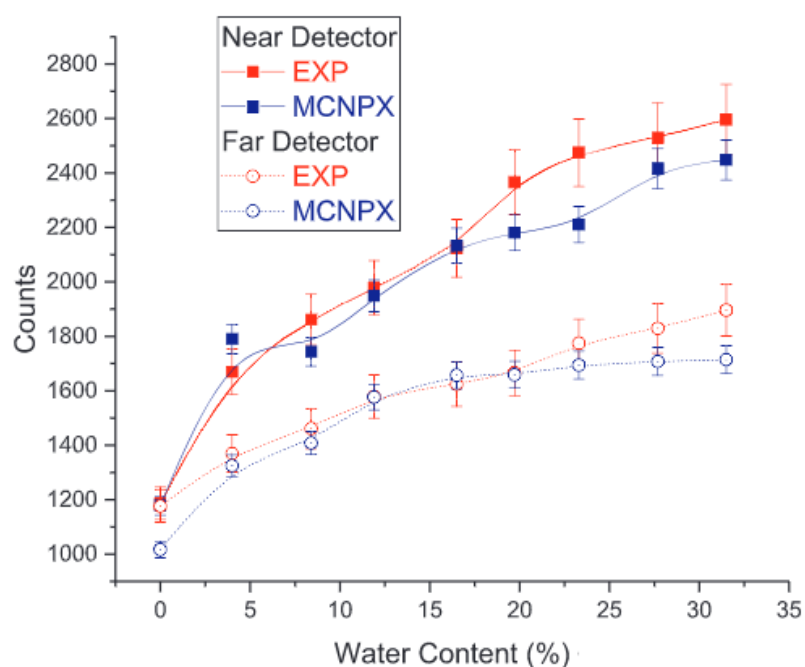


Рисунок 4 – Скорость счета детекторов в зависимости от влажности почвы

В результате была получена кривая отношения отклика детекторов от влажности почвы, изображенная на рисунке 5, результаты реального эксперимента хорошо согласуются с расчетными экспериментами MCNPX2.6.

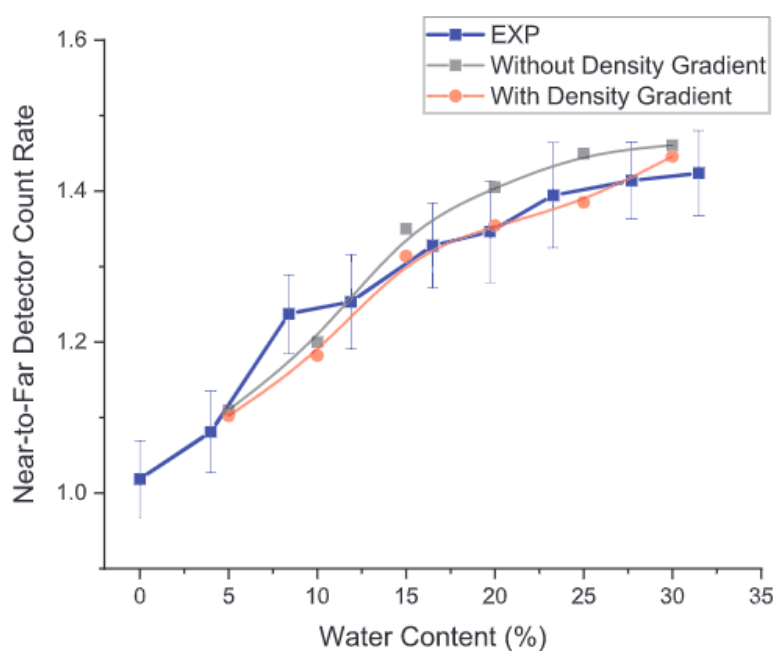


Рисунок 5 – Результаты эксперимента

Несмотря на новый подход к известному методу, работа [4] все еще следует тенденциям использования нейтронного источника, погруженного в почву. Напротив, в работе [5] предложен концептуально новый метод использования нейтронов для определения влажности почвы. Авторы предлагают использовать источник нейтронов на поверхности почвы. Нейтронный источник помещается в полиэтиленовый коллиматор, который направляется на поверхность изучаемого участка почвы. Над исследуемым участком устанавливается система детекторов, которая регистрирует рассеянные нейтроны, модель такой установки, построенная в MCNPX проиллюстрирована, на рисунке 6.

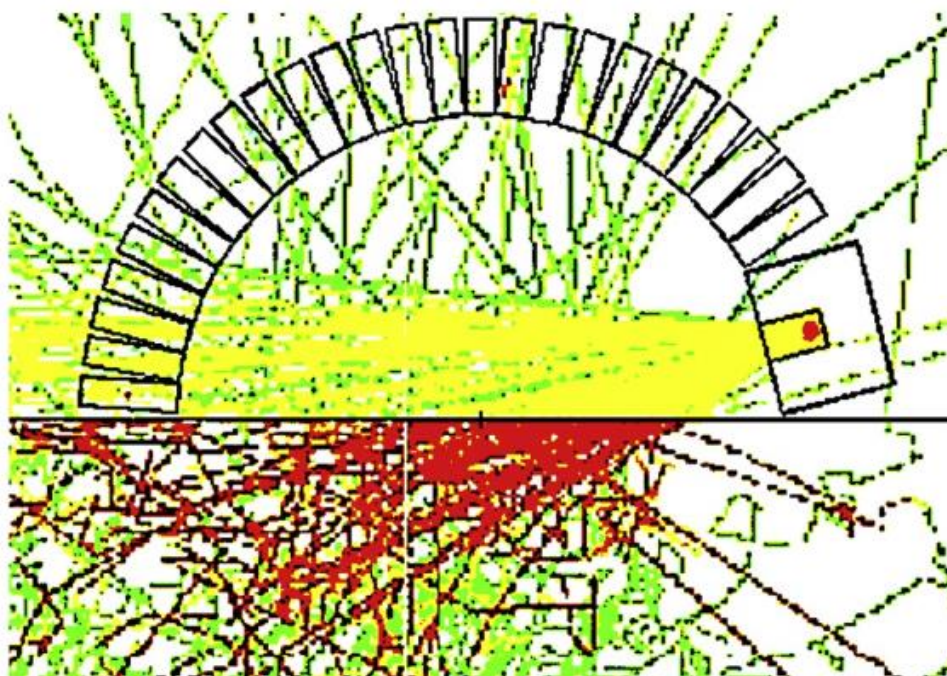


Рисунок 6 – Расчетная модель установки

В ходе исследования промоделирован перенос нейтронов в такой системе, при этом влажность почвы повышалась от 2% до 30% шагом в 2%. В итоге создана так называемая матрица отклика, имеющая 16 столбцов и 26 строчек, воспроизведенная в виде графика зависимости отклика детектора от его положения и влажности почвы на рисунке 7. Предполагается, что влажности неизвестной почвы определяется сравнением с наработанной базой данных в виде матрицы отклика с помощью метода наименьших квадратов.

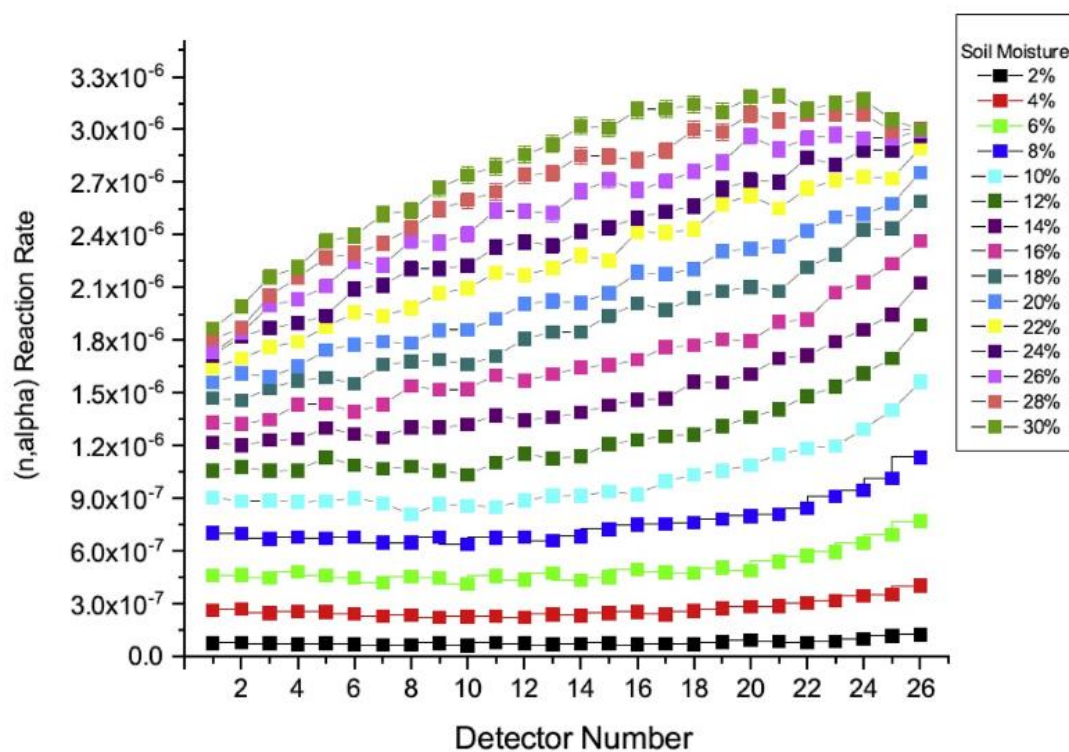


Рисунок 7 – Отклик детектора в зависимости от его положения и влажности почвы

Авторы работы делают вывод, что для источника мощностью  $10^8$  н/с (активность такого источника соответствует величине 1,3 Кю) необходимое время проведения эксперимента займет 3 минуты.

В своем исследовании авторы использовали точечный источник, настоящая работа является идейным продолжателем [5] и нацелена на проработку модели подобной установки реальных размеров, с помощью такой модели предполагается доказать применимость точечной модели источника для предварительных оценок результата реального эксперимента.

## 2 Расчетная часть

### 2.1 Источник нейтронов

Для реализации предлагаемого метода необходим нейтронный источник со стабильным выходом нейтронов. Радиоизотопные источники способны обеспечить необходимый ток нейтронов, кроме того такие источники обладают рядом преимуществ: портативность, мобильность, доступность, простота в эксплуатации, минимальный состав высококвалифицированных специалистов.

На практике, как правило, используются источники нейтронов на основе мелкозернистой смеси диоксида Pu и Be [6], смесей оксидов Am ( $\text{AmO}_2$ ,  $\text{Am}_2\text{O}_3$ ) и Be [6], а также источники на основе чистых интерметаллидов  $\text{PuBe}^{13}$  или  $\text{AmBe}^{13}$  [7].

#### 2.1.1 Компоновка источника

Наиболее распространены радиоизотопные источники на основе ( $\alpha, n$ )-реакций, такие источники состоят из ядер-эмиттеров  $\alpha$ -частиц и легких изотопов ( $\text{Li}^{6,7}$ ,  $\text{Be}^9$ ,  $\text{B}^{10,11}$ ,  $\text{O}^{17,18}$ ). В таблице 1 обобщены характеристики некоторых ядер-излучателей  $\alpha$ -частиц [8, 9].

Таблица 1 – Характеристики изотопов-эмиттеров  $\alpha$ -частиц

Изотоп	Период полураспада по каналу $\alpha$ -распада, лет	Выход $\alpha$ -частиц, $\alpha/(\text{с} \cdot \text{г})$	Средняя энергия $\alpha$ -частиц, МэВ
$^{232}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^3$	4,00
$^{233}\text{U}$	$1,59 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^8$	4,82
$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$	$7,9 \cdot 10^4$	4,40
$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^4$	4,19
$^{237}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^7$	4,77
$^{238}\text{Pu}$	87,74	$6,4 \cdot 10^{11}$	5,49
$^{239}\text{Pu}$	$2,41 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^9$	5,15
$^{240}\text{Pu}$	$6,56 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^9$	5,15
$^{241}\text{Pu}$	$5,90 \cdot 10^5$	$9,4 \cdot 10^7$	4,89
$^{241}\text{Am}$	433,6	$1,3 \cdot 10^{11}$	5,48

Согласно таблице 1 изотопы  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  обладают наибольшими удельными выходами  $\alpha$ -частиц:  $6,4 \cdot 10^{11} \alpha/(\text{с} \cdot \text{г})$  и  $1,3 \cdot 10^{11} \alpha/(\text{с} \cdot \text{г})$  соответственно. В настоящей работе, в качестве активного изотопа выбран  $^{241}\text{Am}$ . На рисунке 8 представлена схема  $\alpha$ -распада изотопа  $^{241}\text{Am}$ . Согласно представленной схеме, наиболее вероятная энергия  $\alpha$ -частицы составляет 5,486 МэВ.

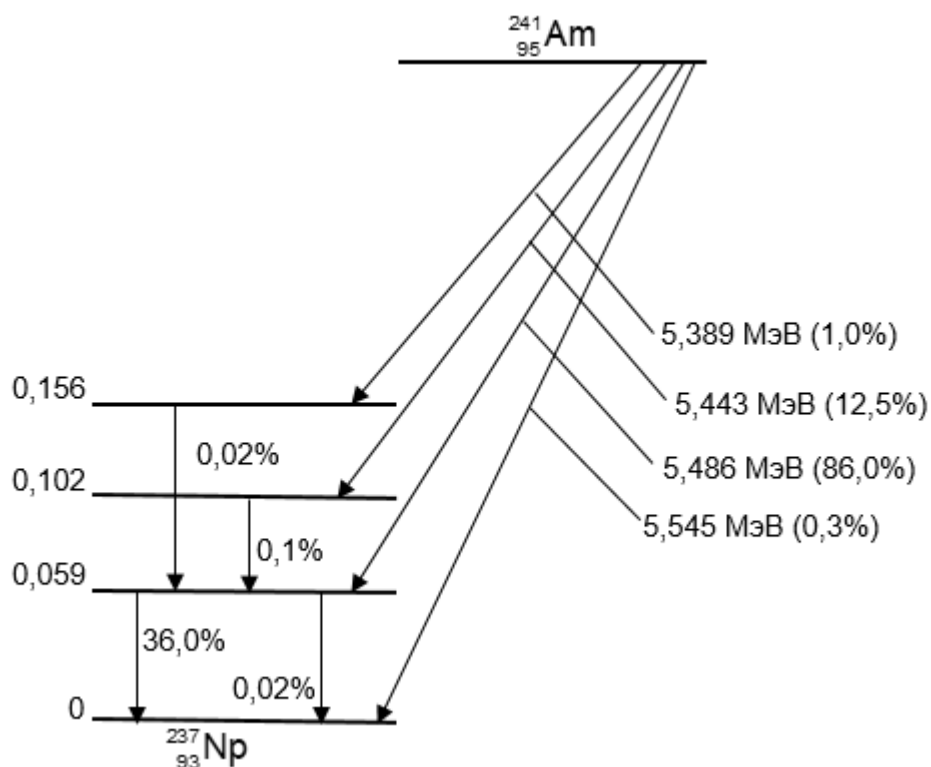


Рисунок 8 – Схема  $\alpha$ -распада изотопа  $^{241}\text{Am}$

Выбор материала, на котором непосредственно протекает  $(\alpha, n)$ -реакция зависит как от его совместимости с уже выбранным  $^{241}\text{Am}$  в качестве эмиттера, так и от выхода нейтронов, который прямо пропорционален сечению  $(\alpha, n)$ -реакции на ядре. Зависимости микроскопического сечения  $(\alpha, n)$ -реакции на различных легких ядрах, для которых  $(\alpha, n)$ -реакция наиболее изучена, от энергии налетающей  $\alpha$ -частицы представлены на рисунке 9 [10]. На рисунке 9 отмечена наиболее вероятная энергия  $\alpha$ -частицы от  $^{241}\text{Am}$ . При прохождении в веществе,  $\alpha$ -частица замедляется, т.е. действительная энергия  $\alpha$ -частицы на момент реакции с легким ядром оказывается меньше 5,486 МэВ. Согласно рисунку 9, наибольшим интегральным по энергии сечением  $(\alpha, n)$ -реакции обладает изотоп  $^9\text{Be}$ .

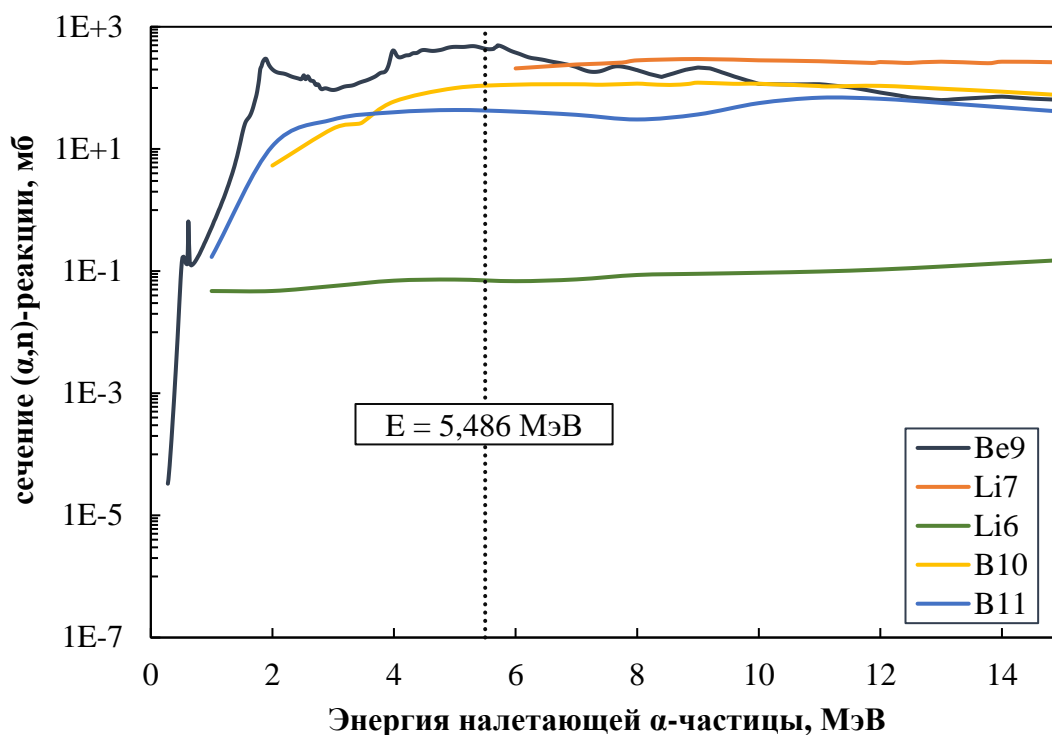


Рисунок 9 – Зависимости сечения (α,n)-реакции на некоторых легких ядрах от энергии налетающей α-частицы

Помимо большого сечения (α,n)-реакции, изотоп Be также обладает хорошей совместимостью с америцием. Кроме того, источники  $^{241}\text{AmBe}$  хорошо изучены к настоящему моменту [11, 12, 13] и не нуждаются в громоздкой защите от гамма-излучения [13].

В качестве капсульного источника нейтронов выбран широко распространенный Am-Be источник нейтронов (капсула AmershamX.14, код AMN.25) активностью 370 ГБк. Активная часть капсулы AmershamX.14 представляет собой мелкозернистую смесь кристаллов  $\text{AmO}_2$  и Be. Так как, пропорции смешивания компонентов активной части капсулы X.14 и данные о внутренней зернистой структуре является коммерческой тайной производителя (Amersham International plc.) и отсутствуют в открытой литературе, проведено дополнительное моделирование с целью определения пропорций смешивания и размеров кристаллов смеси. Эта дополнительная симуляция необходима, так как энергетический спектр (α,n)-нейтронов, образующихся в реакциях (α,n) на изотопах  $^{17,18}\text{O}$  и  $^7\text{Be}$  зависит от размеров смешиваемых кристаллов. Использование гомогенного приближения приведет к ошибке в расчете спектра

и завышенному значению интегрального выхода нейтронов, поэтому необходимо учесть детали геометрии капсулы внутреннюю структуру активной части капсулы.

Обзор доступной в научной периодике информации показал, что размер зерен смешиваемых компонент в капсулах данного типа может варьироваться от 2 до 10 мкм [14, 15], а плотность смеси от 0,9 до 1,5 г/см<sup>3</sup> [16, 17]. Для дальнейших расчетов выбран источник, следующей компоновки: исследуемый AmBe источник изготавливается путем смешивания зерен порошка AmO<sub>2</sub> (плотность зерна 10,58 г/см<sup>3</sup>) и металлического Be (1,85 г/см<sup>3</sup>) по пропорциям 1:12 и механически прессуется до плотности 1 г/см<sup>3</sup>, при этом размер зерен варьируется от 2 до 4 мкм, изотопный состав такого источника приведен в таблице 2. Оболочка источника состоит из нержавеющей стали следующего состава(% wt): C – 0.004; Mn – 1.59; P – 0.011; S – 0.008; Si – 0.37; Cr – 16.96; Ni – 13.61; Mo – 2.29; Fe – 65.16. Чертеж капсулы AmershamX.14 представлен в приложении В.

Таблица 2 – Изотопный состав AmBe источника

Изотоп	Содержание, %	Абсолютное содержание в источнике $N$ , $10^{24}$ ядер
<sup>9</sup> Be	100,000	$1,22 \cdot 10^{-1}$
<sup>16</sup> O	99,757	$6,46 \cdot 10^{-4}$
<sup>17</sup> O	0,038	$2,46 \cdot 10^{-7}$
<sup>18</sup> O	0,205	$1,33 \cdot 10^{-6}$
<sup>241</sup> Am	94,613	$3,06 \cdot 10^{-4}$
<sup>242</sup> Am	3,596	$1,16 \cdot 10^{-5}$
<sup>243</sup> Am	1,791	$5,80 \cdot 10^{-6}$

### 2.1.2 Спектр AmBe источника

Для исследования нейтронных характеристик источника использовалось гибридное моделирование. Расчет выхода нейтронов в результате ( $\alpha$ ,n)-реакций (первичные) выполнялся в программном коде Sources-4C [18]. Значительный вклад в спектр нейтронов источника дают нейтроны реакций (n,2n) на изотопах

$^{17,18}\text{O}$ , кроме того (n,2n)-реакции на  $^9\text{Be}$  и реакция деления изотопов америция (вторичные) обладают сравнимым сечениями в области энергии первичных нейтронов (см. рисунок 10) [10], их вклад в формируемое нейтронное поле (низкоэнергетический хвост) также был учтен. Перенос нейтронов в веществе источника моделировался с помощью прецизионного программного кода PHITS-2.88 [19], реализующего перенос частиц методом Монте-Карло. Модель расчетной модели в программе PHITS изображена на рисунке 11.

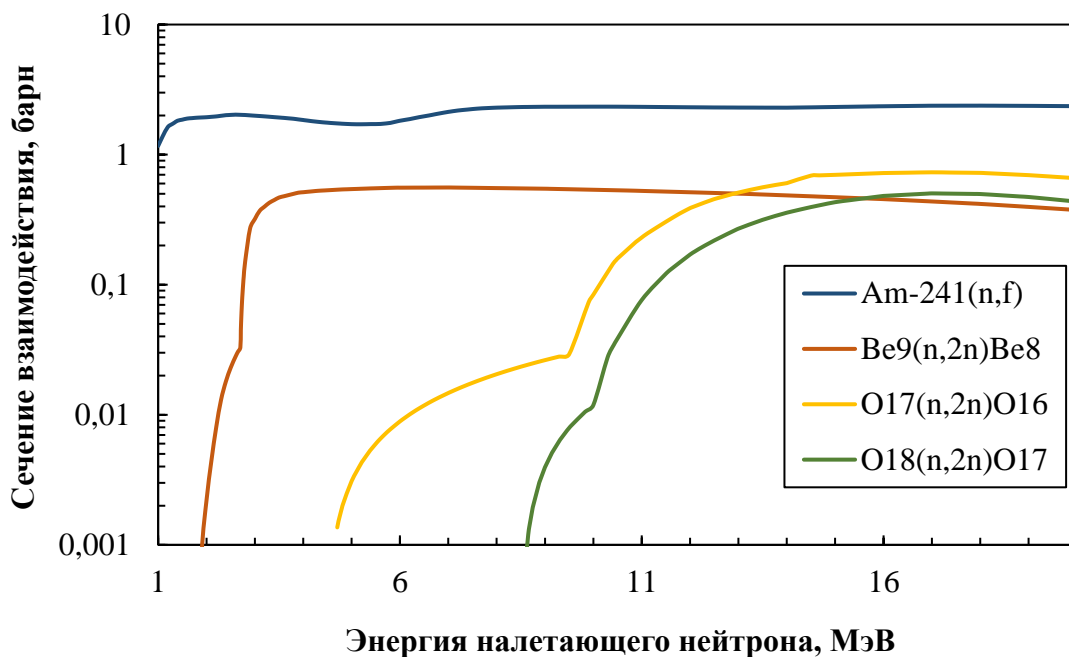


Рисунок 10 – Сечение вторичных реакций

В силу того, что Sources-4C не способен рассчитывать сложную гетерогенную (мелкозернистую) структуру вещества, спектр первичных нейтронов моделировался в программе Sources-4C следующим образом [12]:

- 1) расчет вероятности выхода  $\alpha$ -частицы из  $\text{AmO}_2$  зерна сферической формы;
- 2) подготовка спектра  $\alpha$ -частиц внутри и на поверхности сферы в многогрупповом приближении;
- 3) расчет в Sources-4C спектра нейтронов ( $\alpha$ ,n)-реакции на ядрах  $^{17,18}\text{O}$  внутри зерна используя модель – Homogeneous Mixture Problems;
- 4) расчет в Sources-4C спектра нейтронов ( $\alpha$ ,n)-реакции на ядрах вне зерна, используя модель – Beam Problems.



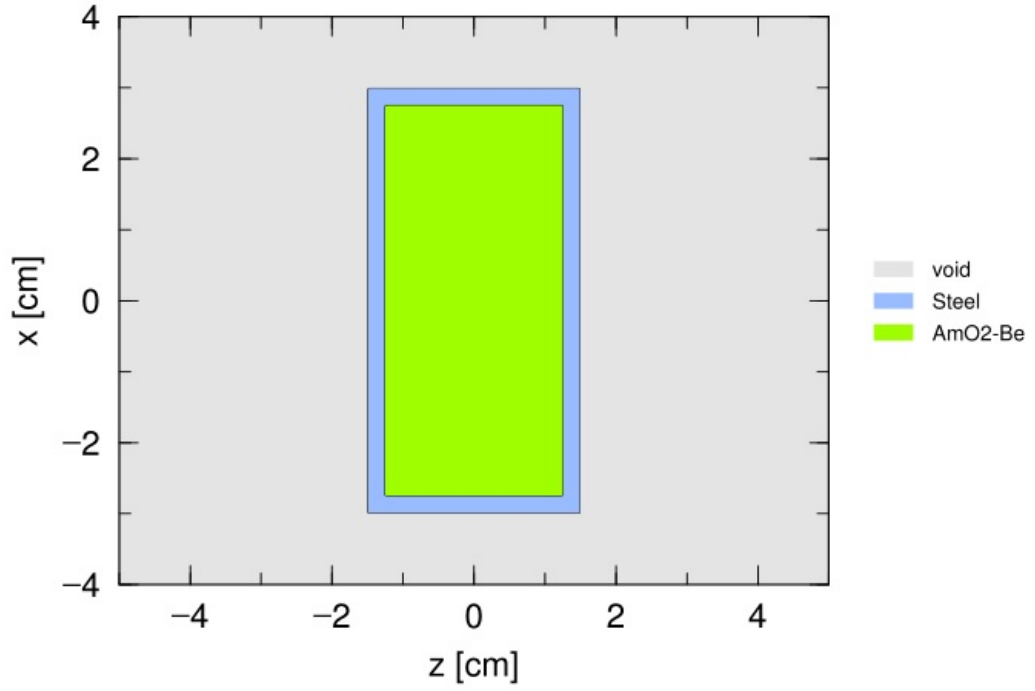


Рисунок 11 – Расчетная модель капсулы X14

Вероятность  $\alpha$ -частицы покинуть поверхность сферы радиуса  $r = 1,5$  мкм, где  $R_\alpha(E)$  – пробег  $\alpha$ -частицы в зерне  $\text{AmO}_2$ , можно описать следующей формулой [20]:

$$P_\alpha(E) = \frac{2}{\pi^2} \cdot \int_0^{\pi/2} \left[ \arcsin\left(\frac{R_\alpha(E) \cdot \sin \theta}{2r}\right) + \left(\frac{R_\alpha(E) \cdot \sin \theta}{2r}\right) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{R_\alpha(E) \cdot \sin \theta}{2r}\right)^2} \right] \cdot d\theta. \quad (23)$$

В свою очередь дифференциальный спектр  $\alpha$ -частиц, излучаемых с поверхности цилиндра есть:

$$n_\alpha(E) = A_v \cdot \frac{dP_\alpha(E)}{dE}, \quad (24)$$

где  $A_v = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ } \alpha/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$  – удельная объемная активность  $\text{Am}^{241}$  (см. таблица 1).

Таким образом, для получения дифференциального спектра  $\alpha$ -частиц необходимо выражение для  $R_\alpha(E)$ , к тому же т.к.  $P_\alpha(E)$  есть сложная функция от  $R_\alpha(E)$ , то в результате дифференцирования возникает  $dR_\alpha(E)/dE$  или  $1/\varepsilon(E)$ , где  $\varepsilon(E) = dE/dx$  – ионизационные потери  $\alpha$ -частиц в среде  $\text{AmO}_2$ . Для решения такой задачи была использована программа SRIM [21], однако программа работает только с чистыми материалами,  $R_\alpha(E)$  и  $\varepsilon(E)$ . Для расчета

ионизационных характеристик  $\alpha$ -частиц в сложном соединении  $\text{AmO}_2$  было использовано правило Брегга-Климана [22]:

$$\frac{1}{R_{\text{смеси}}} = \sum \left( \frac{w_i}{R_i} \right), \quad (25)$$

$$\varepsilon_{\text{смеси}} = \frac{1}{\sum (1/\varepsilon_i)}. \quad (26)$$

Спектр  $\alpha$ -частиц, подготовленный для Sources-4C в 22-групповом приближении с помощью следующей формулы:

$$F_i = \int_{E_i}^{E_{i+1}} n_{\alpha} dE, \quad (27)$$

представлен на рисунке 12 и продублирован в таблице 3.

Таблица 3 – Спектр  $\alpha$ -частиц в 22-групповом приближении

№	$E_i$ , МэВ	$E_{i+1}$ , МэВ	$I_{\alpha}, 10^7 \alpha/\text{с}$	$I_{\alpha}, \%$
0	0,005	0,255	2,777	7,56
1	0,255	0,505	1,455	3,96
2	0,505	0,755	1,304	3,55
3	0,755	1,005	1,272	3,46
4	1,005	1,255	1,279	3,48
5	1,255	1,505	1,305	3,55
6	1,505	1,755	1,340	3,65
7	1,755	2,005	1,381	3,76
8	2,005	2,255	1,425	3,88
9	2,255	2,505	1,473	4,01
10	2,505	2,755	1,522	4,14
11	2,755	3,005	1,572	4,28
12	3,005	3,255	1,624	4,42
13	3,255	3,505	1,676	4,56
14	3,505	3,755	1,729	4,71
15	3,755	4,005	1,782	4,85
16	4,005	4,255	1,836	5,00
17	4,255	4,505	1,890	5,14
18	4,505	4,755	1,944	5,29
19	4,755	5,005	1,999	5,44
20	5,005	5,255	2,054	5,59
21	5,255	5,505	0,949	2,67

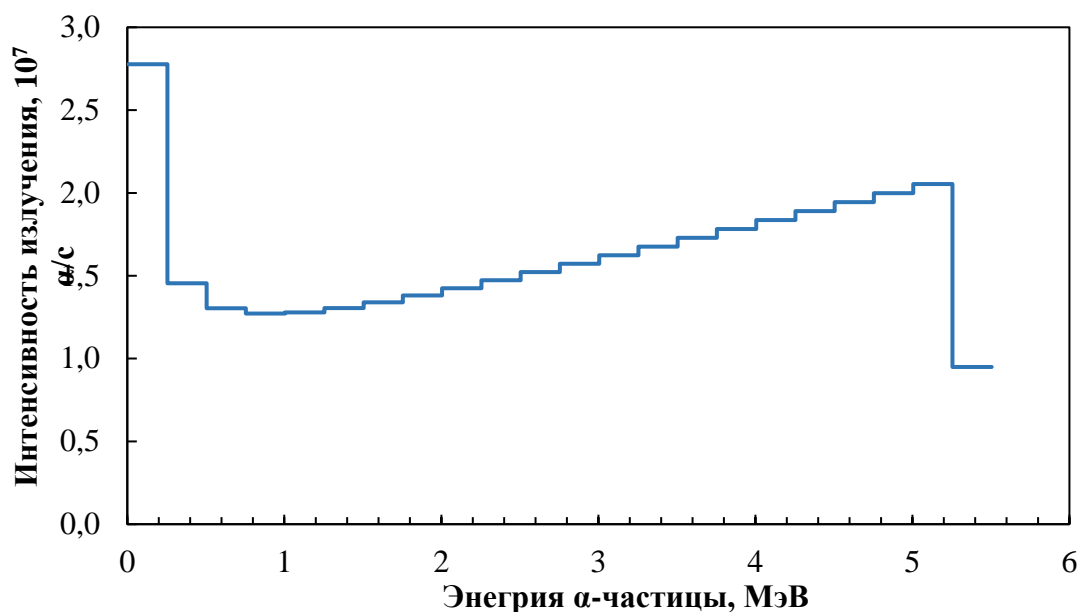


Рисунок 12 – спектр  $\alpha$ -частиц, покидающих зерно диаметра 3 мкм

В результате гибридного моделирования, получены спектры плотностей тока нейтронов непосредственно от  $(\alpha, n)$ -реакций, а также спектры после моделирования переноса нейтронов в PHITS (см. рисунок 13) в 52-групповом приближении (таблица А.1 приложения А).

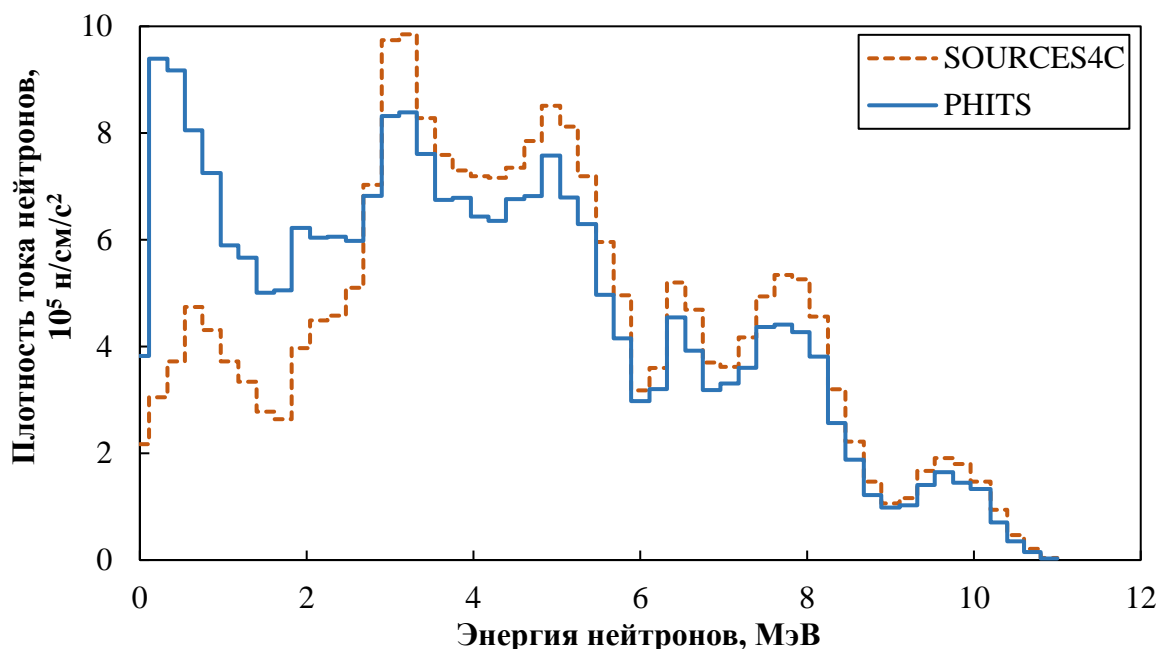


Рисунок 13 – Спектры нейтронов от  $(\alpha, n)$ -реакций (Sources-4C) и в результате расчета переноса в среде источника (PHITS)

На рисунке 13 заметен характерный низкоэнергетический «хвост», который возникает в результате вклада в общее нейтронное поле источника от

нейтронов (n,2n)-реакций, протекающих на ядрах  $\text{Be}^9$ , спектр нейтронов  $\text{Be}^9(\text{n},2\text{n})\text{Be}^8$  продемонстрирован на рисунке 14.

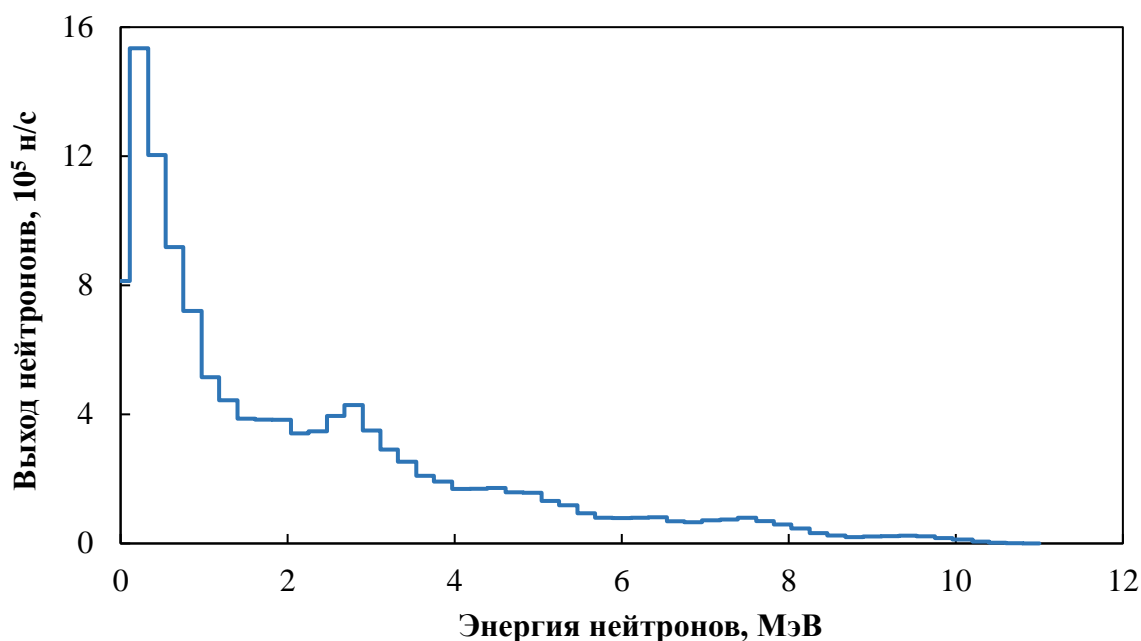


Рисунок 14 – Выход нейтронов от реакции  $\text{Be}^9(\text{n},2\text{n})\text{Be}^8$

Вклад же реакций  $\text{Am}(\text{n},\text{f})$  и  $\text{O}^{17,18}(\text{n},2\text{n})\text{O}^{16,17}$  несопоставим со вкладом от реакции  $\text{Be}^9(\text{n},2\text{n})\text{Be}^8$  (см. таблицу 4).

Таблица 4 – Вклад в выход нейтронов от различных реакций

реакция	(n,a)	$\text{Be}(\text{n},2\text{n})$	$\text{Am}(\text{n},\text{f})$	$\text{O}(\text{n},2\text{n})$
Q, н/с	2,29E+07	1,23E+07	1,25E+04	4,10E+03
g, %	64,91	35,04	0,04	0,01

Полученный спектр нейтронов хорошо согласуется с рекомендованным спектром [23] (см. рисунок 15). Спектры построены по данным из таблица А.2 приложения А.

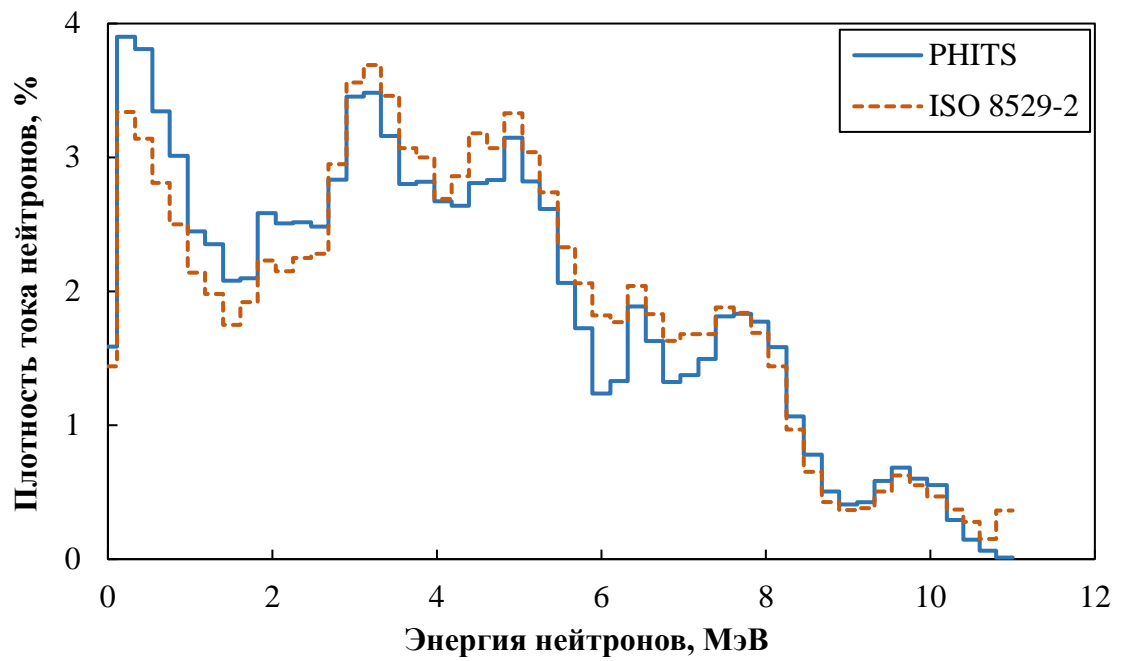


Рисунок 15 – сравнение полученного спектра нейтронов с результатом реального эксперимента

Полученный спектр AmBe источника необходим для дальнейшего моделирования переноса нейтронов в системе по мониторингу влажности почвы.

## **2.2 Система по определению влажности почвы**

Как уже было упомянуто в пункте 1, настоящий метод по определению влажности почвы основан на термализации нейтронов источника во влажной почве и последующей регистрации рассеянных тепловых нейтронов. Таким образом, для осуществления заявленного метода необходимы:

- сколлимированный пучок нейтронов;
- образец влажной почвы;
- система детекторов для регистрации углового рассеяния тепловых нейтронов.

При моделировании переноса нейтронов, в оригинальной работе [5] авторы приняли точечную модель источника с заданным спектром. Напротив, в настоящей работе проведены комплексные расчетные исследования узла формирования пучка нейтронов для мониторинга влажности почвы с учетом реальных размеров коллиматора и капсульного источника нейтронов.

### **2.2.1 Установка по исследованию влагосодержания почвы**

Для определения влажности образца почвы необходима библиотека данных, ставящая в соответствие содержание воды в почве матрицу отклика системы детекторов. Такую библиотеку предлагается создать с помощью лабораторного стенда, в котором последовательно будут изучены подготовленные образцы почвы с заданной влажностью.

На рисунке 16 проиллюстрирована реальная конфигурация предлагаемого лабораторного стенда. Лабораторный стенд для исследования влажность почвы состоит из металлического контейнера внутренними размерами 700×700×500 мм, выполненного из стали AISI-430 или 12X18H10T. С помощью осевого шарнирного соединения к контейнеру крепится подложка, на которой размещается коллиматор нейтронов. В качестве блока (узла) формирования пучка нейтронов используется коллиматор цилиндрической формы, изготавливаемый из высокоплотного борированного полиэтилена с

внутренней полостью, способной разместить до пяти капсул типа AmershamX.14. Система из 30-ти детекторов жестко зафиксирована с помощью пластины-держателя, выполненной из листового металла.

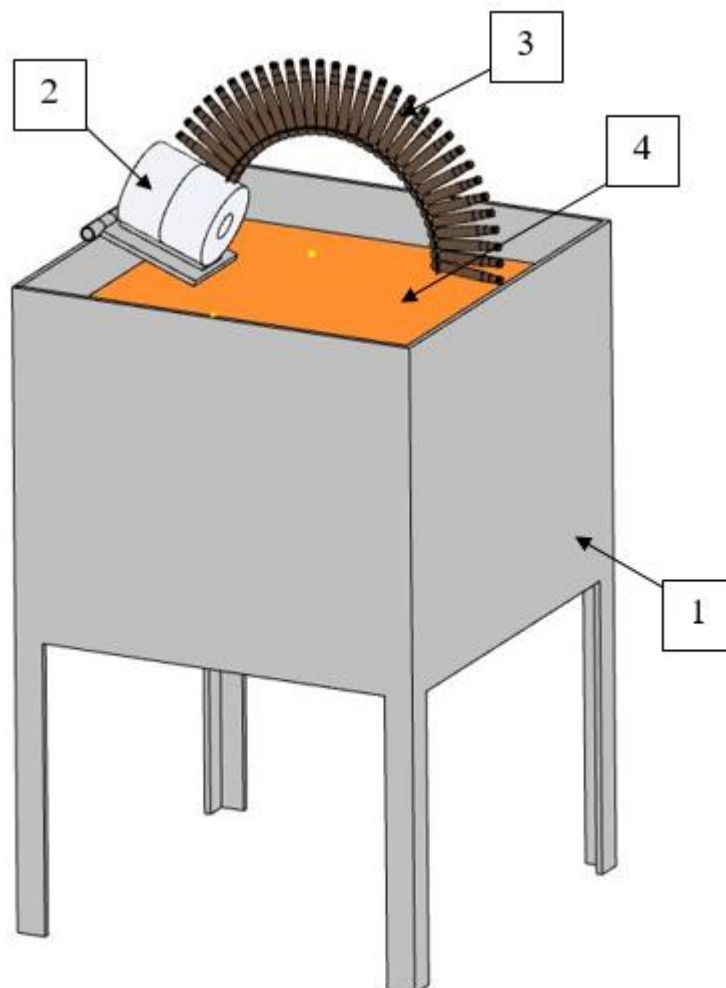


Рисунок 16 – Конфигурация лабораторного стенда:

- 1 – металлический контейнер; 2 – подложка с коллиматором;  
3 – система из 30-ти детекторов; 4 – исследуемая почва.

Капсульные источники нейтронов внутри коллиматора располагаются соосно цилиндрическому полиэтиленовому блоку (см. рисунок 17). Благодаря шарнирному креплению подложка с коллиматором может располагаться под углом до  $30^\circ$  к поверхности исследуемой почвы. Сборочный чертеж узла формирования пучка нейтронов представлен в приложении В.

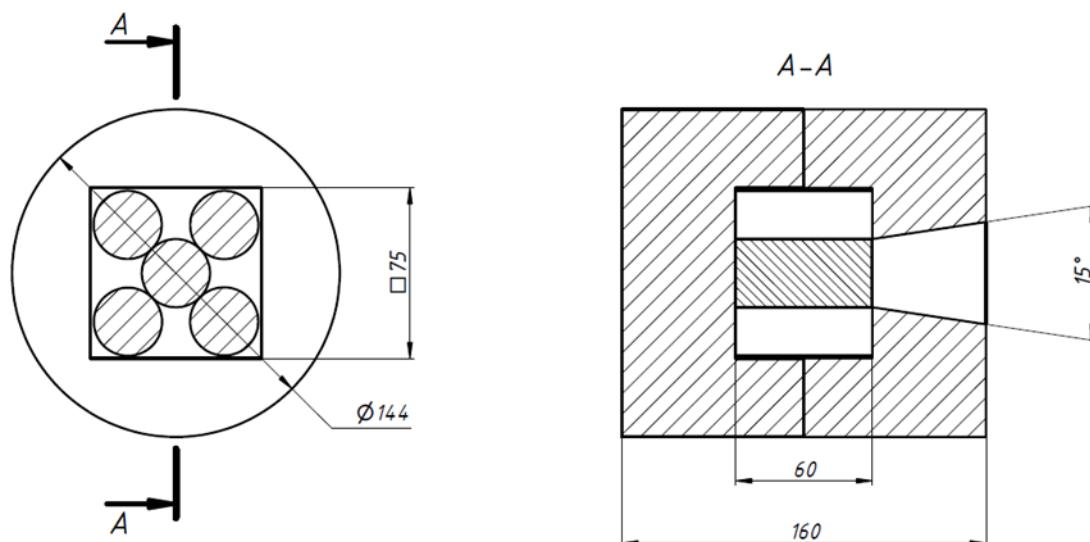


Рисунок 17 – Размеры коллиматора

В качестве детекторов были выбраны пропорциональные счетчики, наполненные  $\text{BF}_3$ , по сравнению с детекторами, содержащими  $\text{He}_3$  или  $\text{Li}_6$ , такие счетчики экономически более доступны, просты в эксплуатации, более,  $\text{BF}_3$  рождает значительно больше электрон-ионных пар на один поглощенный нейтрон [24].

Систему, изображенную на рисунке 16, предполагается использовать также и в полевых условиях, в таком случае коллиматор и счетчики располагают непосредственно на поверхности участка почвы или каменной породы.

### 2.2.2 Материалы и методы моделирования

Моделирования переноса нейтронов, а также расчет отклика детекторов, проводился с помощью уже известного программного кода PHITS. Количество историй установлено  $10^7$ , таким образом, что относительная погрешность результатов не превосходит 5%.

Состав борированного полиэтилена плотностью  $3 \text{ г/см}^3$  представлен в таблице 5. Цилиндрический блок такой конфигурации не обеспечивает должной радиационной защиты, однако, необходимо заметить, что расчет защиты от нейтронного и гамма-излучения в данной работе не оценивалась, так как акцент смещен в сторону технического обоснования применимости метода. Поэтому, а



также для сокращения времени расчетов, на внешней поверхности коллиматора задана абсолютно черная граница для нейтронов.

Таблица 5 – Материальный состав борированного полиэтилена

Элемент	Массовая доля	Концентрация, (барн·см) <sup>-1</sup>
H	$1,27 \cdot 10^{-1}$	$7,13 \cdot 10^{-2}$
B <sup>10</sup>	$8,61 \cdot 10^{-3}$	$4,87 \cdot 10^{-4}$
B <sup>11</sup>	$3,83 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$
C	$7,23 \cdot 10^{-1}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$
O	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$

В качестве детектора используется пропорциональный счетчик, наполненные BF<sub>3</sub>, параметры выбранного счетчика перечислены в таблице 6.

Таблица 6 – параметры BF<sub>3</sub> счетчика

Параметры	Значение
Габаритная длина, мм	123,8
Габаритный диаметр, мм	16
Эффективная длина, мм	50,8
Эффективный диаметр, мм	15,49
Давление газа, атм.	0,53
Обогащение по изотопу B <sup>10</sup> , %	96

При комнатной температуре (20-25°C) плотность газа в счетчике составляет  $2,99 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

Как уже отмечалось ранее, для осуществления предлагаемого метода необходим библиотека влажности почвы. Для создания такой библиотеки предлагается исследовать подготовленные в лаборатории образцы, представляющие собой смесь сухой почвы и воды в заданном соотношении. Состав сухой почвы представлен в таблице 7 [25], плотность такой почвы составляет 1,52 г/см<sup>3</sup>. Известно, что максимальная влажность почвы в различных регионах в среднем достигает 30% [26], таким образом, содержание воды в исследуемом образце менялось от 0% до 30% с шагом в 2%.

Таблица 7 – Элементный состав сухой почвы

Element	Массовая доля	Концентрация, (барн·см) <sup>-1</sup>
O	0,513713	0,029391
Na	0,006140	0,000244
Mg	0,001330	0,000501
Al	0,068563	0,002326
Si	0,271183	0,008838
K	0,014327	0,000335
Ca	0,051167	0,001169
Ti	0,004605	0,000088
Mn	0,000716	0,000012
Fe	0,056283	0,000923

Расчетная модель, подготовленная с учетом всех описанных деталей, представлена на рисунке 18.

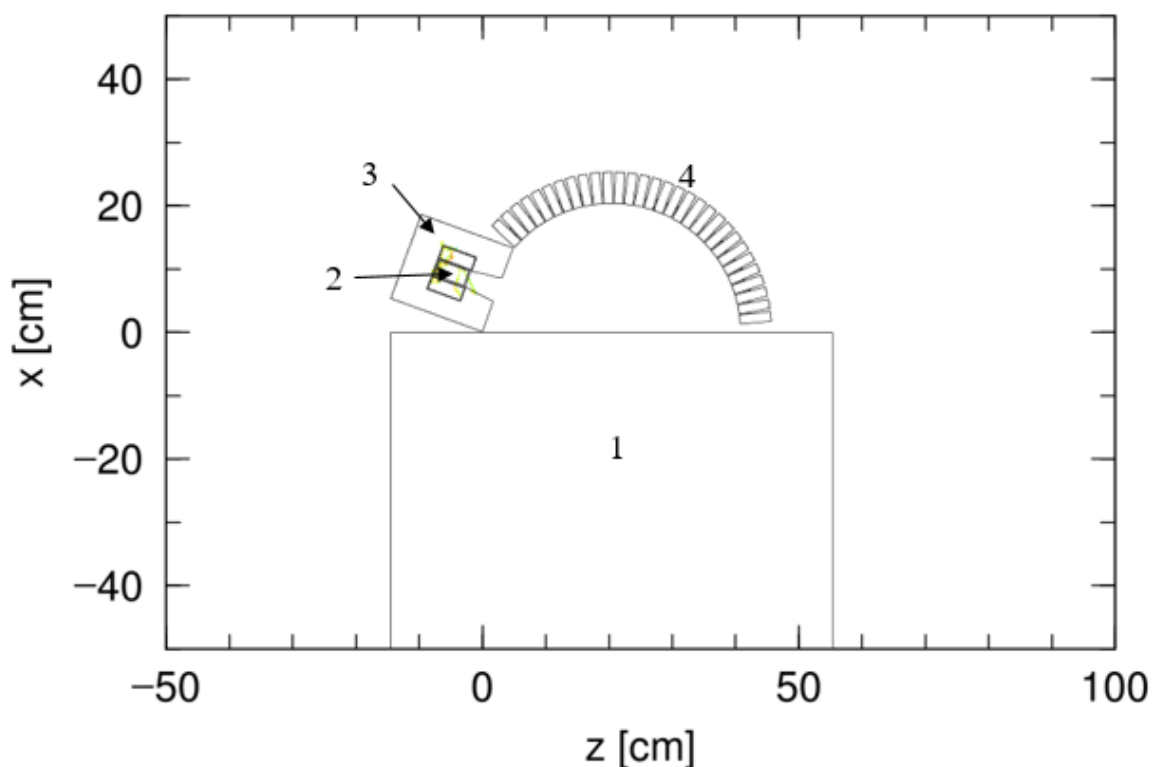


Рисунок 18 – Расчетная модель в PHITS:

1 – образец почвы, 2 – AmBe источник, 3 – коллиматор, 4 – система из 30-ти счетчиков

Стоит отметить также, что для более корректного расчета переноса нейтронов в полиэтилене и почве, где происходит диффузия нейтронов, в области энергий нейтронов менее 1 эВ подключена дополнительная библиотека  $S(\alpha, \beta)$ .

Для обоснования применения системы реальной геометрии, создана также точечная модель системы, аналогичная представленной в оригинальной работе, расчетная модель такой системы проиллюстрирована на рисунке 19.

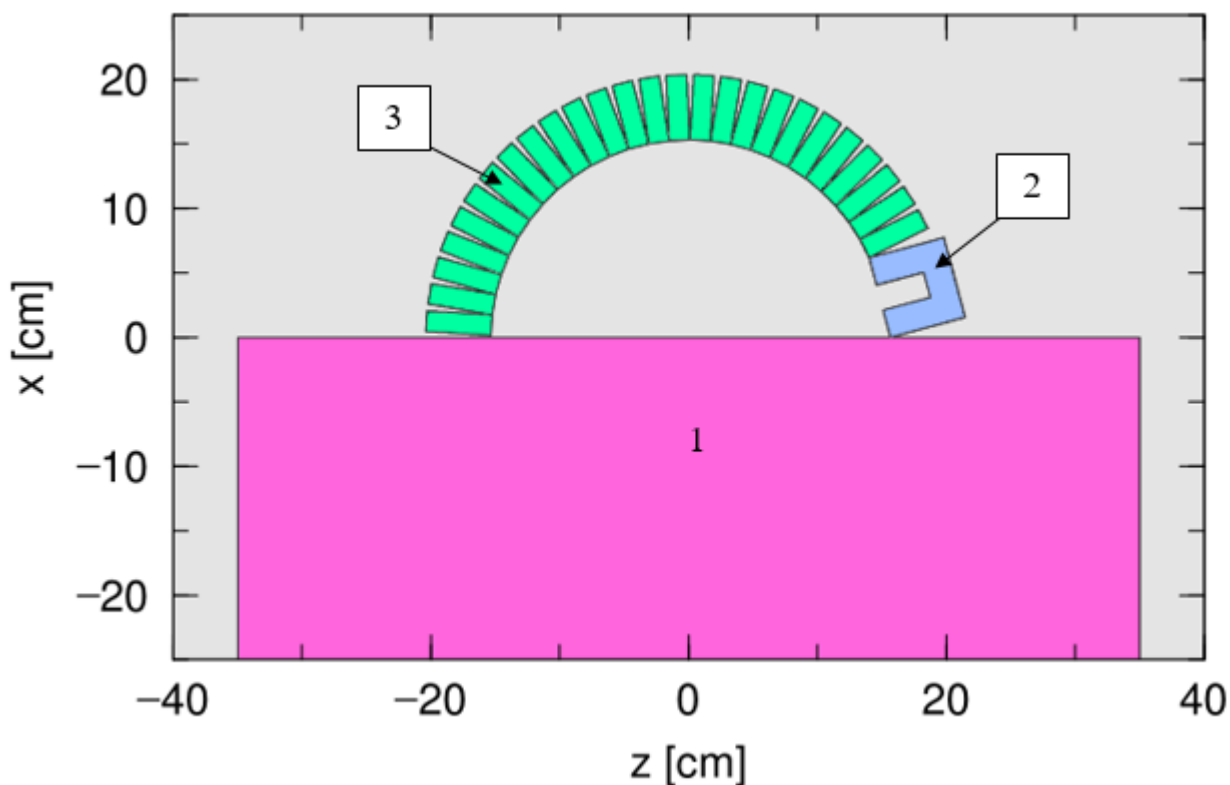


Рисунок 19 – Расчетная модель системы с точечным источником:

1 – образец используемой почвы; 2 – коллиматор, содержащий точечный источник; 3 – система из 26 счетчиков.

Данная модель необходима для получения спектра нейтронов, падающих на поверхность почвы, а также для восстановления углового распределения рассеянных нейтронов. Сравнение результатов перечисленных зависимостей, полученных в двух моделях, позволит судить о достаточности применения точечной модели для описания предлагаемой методики определения влажности почвы.

### 2.2.3 Результаты моделирования

В результате моделирования переноса нейтронов, получены треки частиц в двух системах. На рисунках 20 и 21 представлены рассеяние нейтронов всех энергий нейтронов до 11 МэВ (максимальная энергий нейтронов источника) в системе с точечным источником и в системе с набором реальных источников. Плотность потока нейтронов на рисунках нормирована на один нейтрон источника.

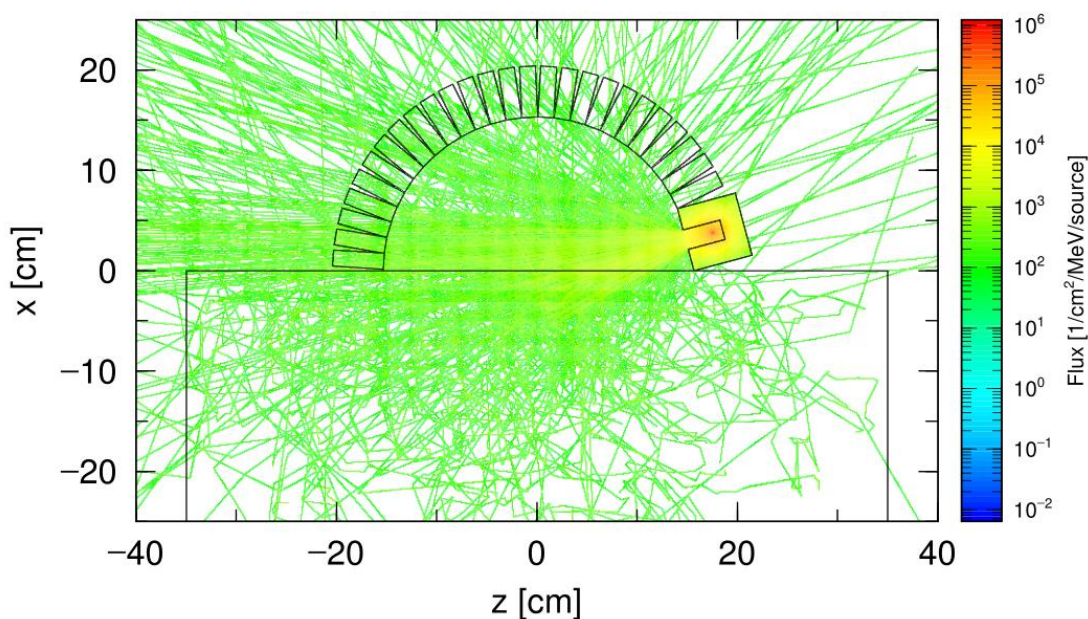


Рисунок 20 – Распределение нейтронов всех энергий в системе с точечным источником

Согласно предварительных результатам представленных на рисунках, можно сказать, что плотность потока нейтронов в объеме счетчиков в системе с набором реальных источников сопоставима с потоком в системе с точечным источником и по величине составляет  $10^3$  н/см<sup>2</sup>/с.

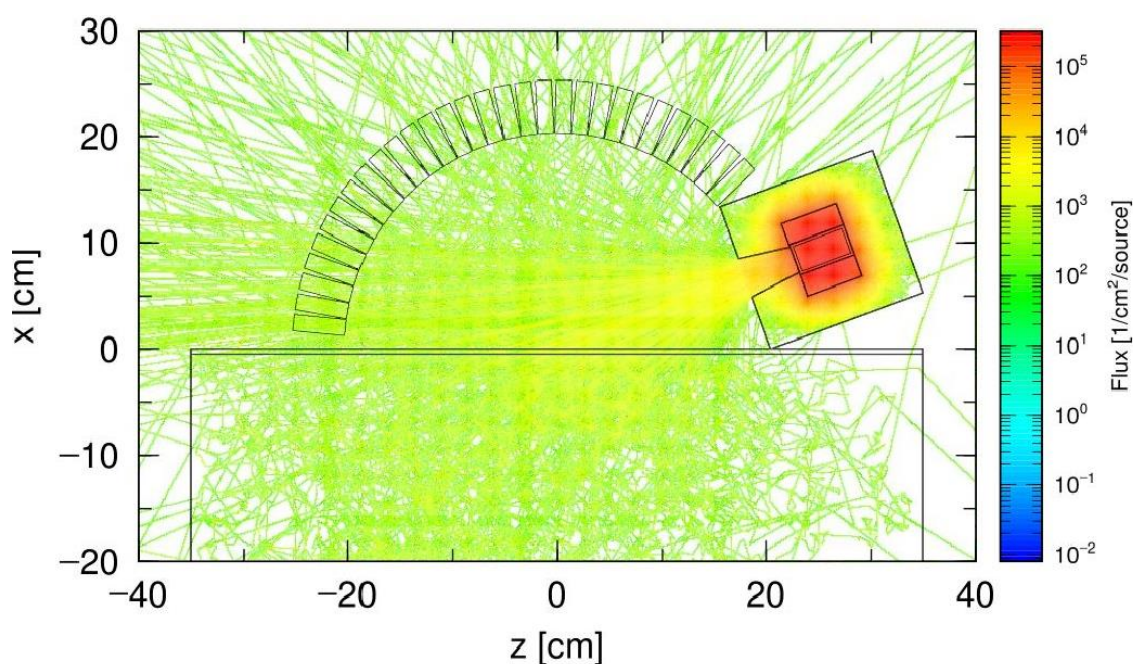


Рисунок 21 – Распределение нейтронов всех энергий в системе с набором реальных источников

С помощью tally-модуля [T-cross] получены спектры токов нейтронов, пересекающих эффективную поверхность почвы, т.е. того участка почвы, что находится непосредственно под счетчиками. Полученные спектры для точечной и реальной моделей сравнивались при различных углах наклона к горизонту коллиматора ( $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ) в реальной модели. Кроме того, с помощью все того же модуля, восстановлено угловое распределение рассеянных нейтронов в двух моделях, влажность почвы варьировалась в широком диапазоне до 30%.

На рисунке 22 представлены спектры нейтронов, падающих на эффективную поверхность (т.е. участок почвы непосредственно под счетчиками) почвы, полученные с использованием точечной и реальной моделей. Спектры построены по данным из таблицы А.3 приложения А. Угол наклона коллиматора в реальной модели менялся от  $15^{\circ}$  до  $30^{\circ}$  с шагом в  $5^{\circ}$ . Результаты нормированы на полный ток нейтронов и представлены в относительных единицах. Согласно полученным результатам, спектры нейтронов совпадают с точечной моделью в широком диапазоне углов. Наилучшее приближение к точечной модели наблюдается при угле к горизонту в  $20^{\circ}$ , при этом наибольшее отклонение от точечной модели по результату расчета составляет 0,98%.

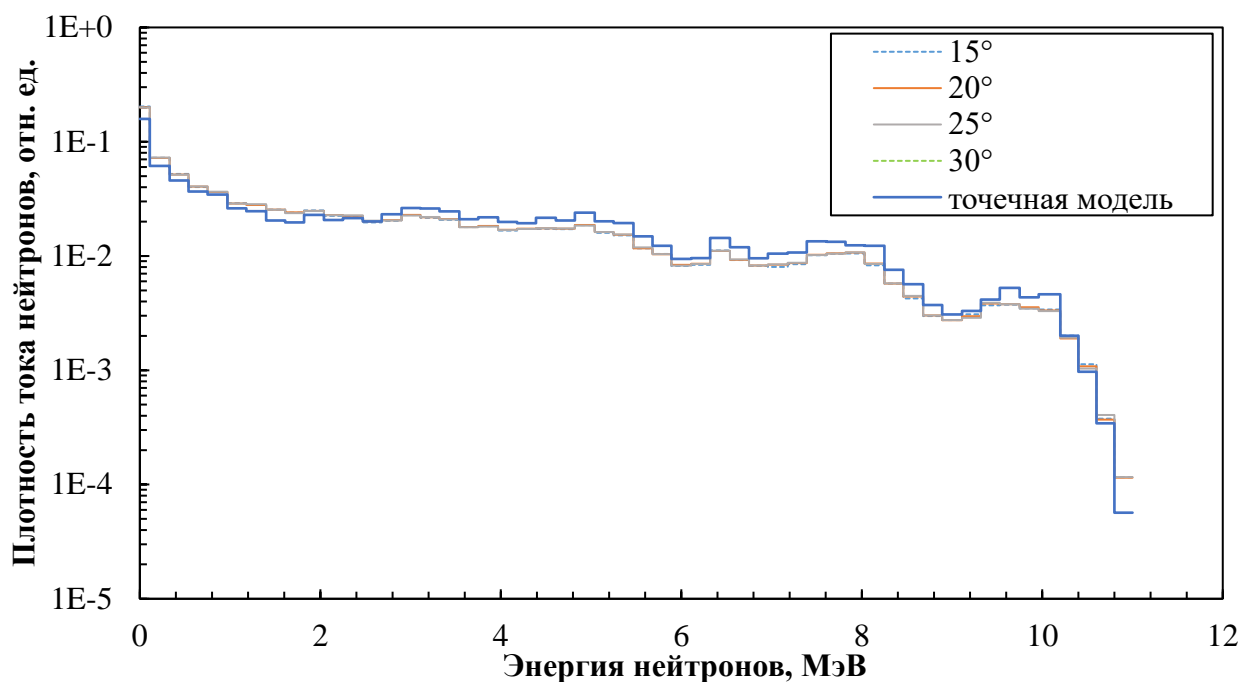
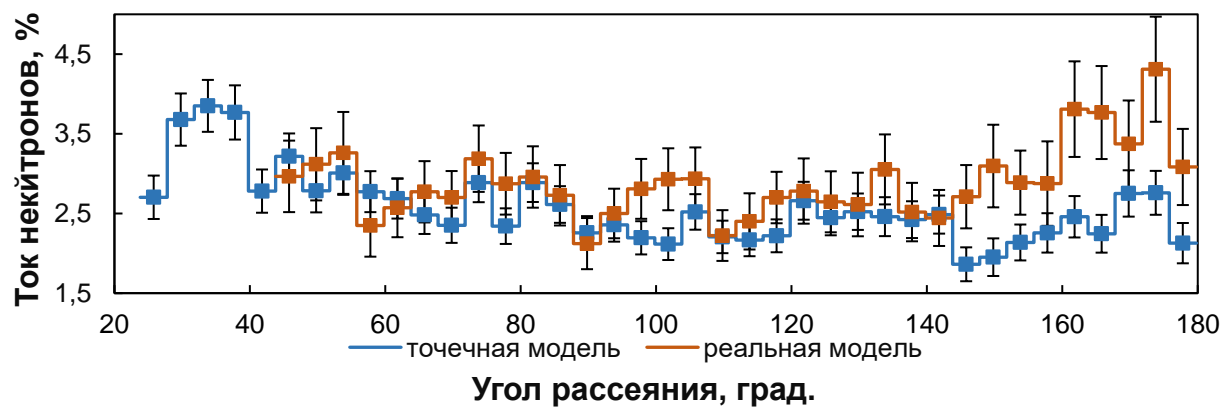


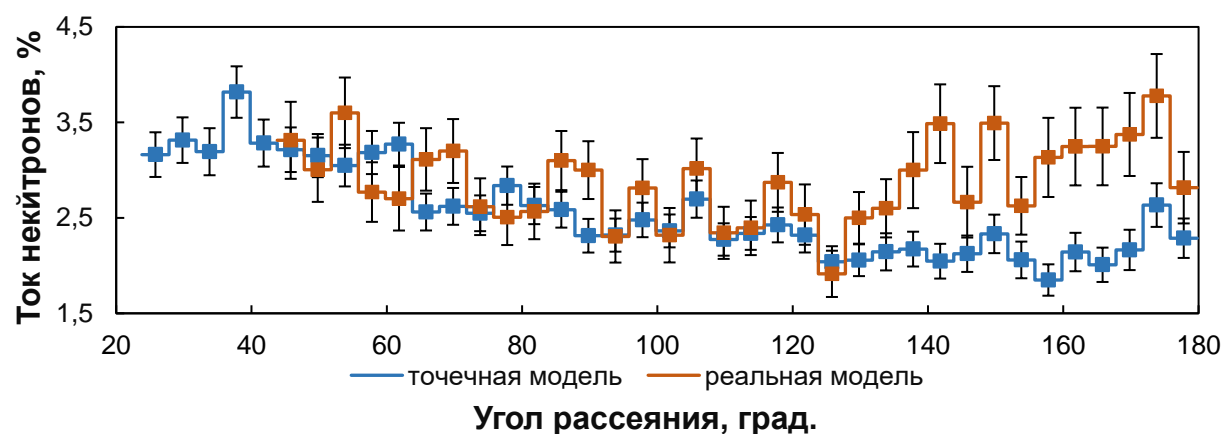
Рисунок 22 – Ток нейтронов через эффективную поверхность почвы

С другой стороны, угловое распределение термализованных в почве нейтронов. Однако, как видно из рисунков 20 и 21, некоторые детекторы попадают под прямой пучок нейтронов, для реальной модели пучок нейтронов охватывает сектор от  $140^\circ$  до  $180^\circ$ , для точечной – от  $160^\circ$  до  $180^\circ$ . Несмотря на то, что детекторы, заполненные  $B^{10}$ , с хорошей эффективностью способны регистрировать также и быстрые нейтроны, было принято решение рассмотреть только распределение нейтронов энергии до 1 эВ, такой подход позволит избежать большую часть нейтронов из прямого пучка (нейтроны энергии  $< 1$  эВ также присутствуют в пучке при замедлении в полиэтилене).

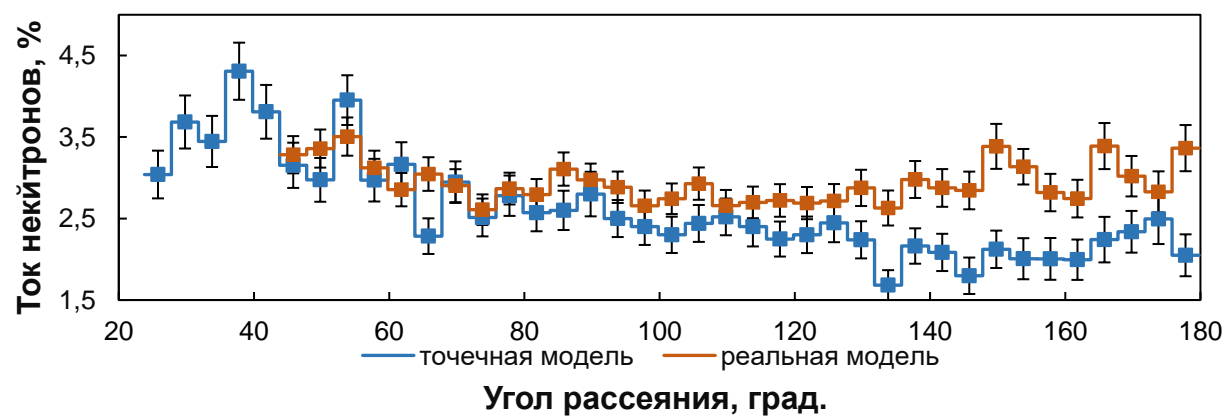
Для получения углового распределения был проведен ряд расчетных экспериментов. Количество историй при расчетах было установлено  $4 \cdot 10^8$  – для реалистичной модели,  $10^8$  – для точечной модели, таким образом при увеличении влажности почвы погрешность результатов убывает, максимальная погрешность составляет 15%. На рисунке 23 представлены угловые распределения нейтронов энергии меньше 1 эВ при различной влажности почвы. Анализируя распределения, можно сказать, что точечная модель вполне согласуется с реальной моделью.



а) 10%



б) 20%



в) 30%

Рисунок 23 – Угловое распределение нейтронов энергии до 1 эВ при различной влажности почвы

### **3 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. В связи с этим, целью данного раздела является анализ возможных социальных, общественных, экологических негативных эффектов, вызванных разработкой, эксплуатацией и утилизацией исследуемого объекта и разработка мер по устранению или смягчению подобных эффектов.

Для достижения цели поставлены ряд задач:

- проанализировать вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть на этапах разработки и эксплуатации объекта исследования;
- обосновать мероприятия по снижению уровня воздействия выявленных вредных и опасных факторов;
- проанализировать мероприятия по обеспечению экологической безопасности;
- выявить вероятные ЧС, а также разработать меры по предотвращению ЧС.

#### **3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

##### **3.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Объектом исследования настоящей работы является система по определению влажности почвы, использующая источник ионизирующего излучения, то основным документом, регламентирующим режим работы с объектом, является СанПиН НРБ–99/2009 [27].

Администрация радиационного объекта несет ответственность за радиационную безопасность и должна обеспечивать [28]:



- получение санитарно-эпидемиологического заключения на выпускаемую продукцию, содержащую источники ионизирующего излучения;
- разработку контрольных уровней воздействия радиационных факторов в организации и санитарно-защитной зоне;
- контроль и учет индивидуальных доз облучения персонала;
- ежегодное в установленные сроки представление заполненного радиационно-гигиенического паспорта организации;
- проведение инструктажа и проверку знаний персонала в области радиационной безопасности;
- установление перечня лиц, относящихся к персоналу групп А и Б.

К персоналу группы А относится сотрудник(ки) непосредственно работающий с источником, у персонала группы А должна быть соответствующая подготовка: документ, подтверждающий обучение по радиационной безопасности, срок действия 5 лет (от организации, имеющей лицензию на данный вид образовательной деятельности); документ, подтверждающий обучение правилам работы с ИИИ. Соответственно, к работе с источниками ионизирующего излучения допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, отнесенные приказом руководителя к категории персонала группы А, прошедшие обучение по правилам работы с источником ионизирующего излучения и по радиационной безопасности, прошедшие инструктаж по радиационной безопасности.

Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

– поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

### **3.1.2 Организация рабочего места исследователя**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ, чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 - 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм [29].

Рабочее кресло должно быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 - 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглубленным передним краем [29].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз студента на расстоянии 500 - 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Должна предусматриваться возможность регулирования экрана: по высоте +3 см, по наклону от 10° до 20° относительно вертикали, в левом и правом направлениях [29].

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является ее размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка [29].

### 3.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований. Основные элементы производственного процесса, формирующие вредные и опасные факторы, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Ионизирующее излучение	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
2. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. Превышение уровня шума	СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
5. Электромагнитное излучение	ГОСТ 12.0.003-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
6. Электрический ток	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

#### 3.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования

В данном подпункте, в соответствии с последовательностью в таблице 3.1 рассматриваются выявленные вредные и опасные факторы.

Источником ионизирующего излучения (ИИИ) непосредственно является радиоизотопный источник нейтронов на основе механической смеси AmBe. Основные пределы доз, согласно [27], представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Основные предельно-допустимые дозы

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал группы А	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Для персонала группы Б установлены предельно-допустимые дозы, составляющие 1/4 от доз для группы А.

Эффекты воздействия радиации на человека обычно делятся на две категории:

– соматические (телесные) – возникающие в организме человека, который подвергался облучению, к соматическому воздействию относятся такие эффекты как: лучевая болезнь, локальные лучевые поражения, лейкозы, опухоли разных органов;

– генетические – связанные с повреждением генетического аппарата и проявляющиеся в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению, к эффектам генетического воздействия относятся генные мутации и хромосомные aberrации.

### **3.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в процессе исследования**

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [30], приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	40	0,1

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. Допустимые уровни звукового давления и уровней звука, создаваемого ПЭВМ, не должны превышать 50 дБ [29].

При недостаточном освещении может возникать дополнительная нагрузка на зрительный анализатор, что приводит к ухудшению самочувствия исполнителя и может привести к ухудшению качества зрения. Основные требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ следующие [31]:

- освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк (не допустимы блики на поверхности экрана);
- яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>;
- яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup> и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [29] напряженность электромагнитного поля (ЭМП) на расстоянии 50 см вокруг крана по электрической составляющей должна не превышать значения, представленные в таблице 11.

Таблица 11 – Допустимые уровни ЭМП от ПЭМВ

Параметр	Диапазон частот	Значение
Напряженность электрического поля	5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Индукция магнитного поля	5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана	–	500 В

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами, соответственно, существует опасность поражения оператора электрическим током. Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний характер. Проходя через организм, электрический ток производит термическое (ожоги), электролитическое (разложение крови и плазмы) и биологическое действия (судорожные сокращения мышц, в том числе мышц сердца и легких). Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

### **3.2.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя**

Ионизирующее излучение на проектируемом объекте представлено в основном в виде нейтронного излучения. Согласно [32], AmBe источник соответствует 2ой категории радиоактивных источников, т.е. опасность для человека очень высока, в связи с чем персоналу необходимо четко соблюдать регламенты работы с источником. Используемая для работы с источниками

геофизическая аппаратура должна быть оснащена манипуляторами для размещения и перемещения источника [33]. Поставка организациям источников и передача их из одной организации в другую производится с соблюдением требований п. 3.5 [28]. Планировка хранилища, площадь и защита помещений определяются с учетом количества, активности и характеристик излучения источников, подлежащих хранению. В хранилище предусматриваются следующие помещения [33]:

- помещения для хранения источников с необходимыми защитными устройствами, для источника категории 2 необходимо использовать защитные контейнеры;

- вспомогательные помещения для дистанционного инструмента, транспортных контейнеров, аппаратуры радиационного контроля, средств индивидуальной защиты, средств дезактивации, различной документации и т.п.

Мощность эквивалентной дозы на внешней поверхности защитных устройств для хранения источников не должна превышать 12,0 мкЗв/ч [33]. На наружные поверхности входной двери для персонала и защитной дверцы проема для контейнеров наносится знак радиационной опасности. По окончании рабочего дня двери закрываются и опечатываются.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путем. В помещение должны подаваться следующие объемы наружного воздуха: при объеме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объеме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция [30]. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25°С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения.

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [34]. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Мероприятия по обеспечению безопасности электроустановок [34]:

- отключение напряжения с токоведущих частей;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, токоведущих частей).

### **3.3 Экологическая безопасность**

Для обеспечения экологической безопасности непосредственно при эксплуатации ИИИ необходимо установить ряд мер по защите селитебной зоны. Установка по мониторингу влагосодержания грунта является радиационным



объектом IV категории, т.к. радиационное воздействие от AmBe источника нейтронов при аварии ограничивается помещениями, где проводятся работы с источником. Загрязнение окружающей среды (атмосферы, гидросферы, литосферы) возможно на этапе утилизации и захоронения ИИИ. На территории Российской Федерации за утилизацию и захоронение радиоактивных отходов ответственно ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО».

Загрязнение атмосферы, гидросферы, литосферы происходит при утечки радиоактивных отходов соответственно в реки, озера, подземные водяные отложения, в почву и низ лежащие слои грунта, а также непосредственно выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Для предотвращения всех вышеперечисленных аварий на «РосРАО» ряд мер по мониторингу состояния окружающей среды и целостности промышленных объектов (превентивизация утечек). На ФГУП «РосРАО» предусмотрены следующие мероприятия по защите окружающей среды [35].

ФГУП «РосРАО» осуществляет забор воды из подземных и поверхностных водных объектов. В отделениях ведется мониторинг подземных вод, включающий наблюдения за уровнем и качеством подземных вод.

Основными источниками выбросов на площадках являются: оборудование котельных, двигатели автотранспорта и дорожной техники, металлорежущие и деревообрабатывающие станки, сварочное и окрасочное оборудование. В целях уменьшения выбросов загрязняющих веществ проводится регулярная проверка эффективности работы пылеулавливающего и газоочистного оборудования, технический осмотр автотранспортных средств и прочие текущие мероприятия. Оценка загрязнения атмосферного воздуха показывает, что приземные концентрации загрязняющих веществ от объектов предприятия на границах нормируемых территорий не превышают предельно допустимые гигиенические нормативы качества атмосферного воздуха [35].

### **3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **3.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

При работе с ИИИ наиболее вероятная чрезвычайная ситуация – радиационная авария. Радиационная авария (РА) – потеря управления ИИИ, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала, стихийными бедствиями или иными причинами, которая привела к облучению людей или радиоактивному загрязнению окружающей среды, превышающему величины, регламентированные для нормальных условий [36].

Администрация радиационных объектов обязана разработать и утвердить план мероприятий по защите персонала в случае РА. Планы мероприятий по защите персонала должны содержать следующие основные разделы:

- оценка характера и размеров радиационной аварии;
- порядок оповещения и информирования;
- обязанности должностных лиц при проведении аварийных работ;
- меры защиты персонала при проведении аварийных работ;
- оказание медицинской помощи пострадавшим.

Во избежание РА предпринимаются превентивные меры, такие как разработка безопасной инфраструктуры на объекте и мониторинг радиационной обстановки. Локальный мониторинг радиационной обстановки (объектовый) на радиационно-опасных объектах организуется руководством радиационно-опасных объектов, прежде всего, с целью оценки эффективности работы системы защиты объекта [37].

#### **3.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

При долговременной работе за ПЭВМ, при проведении моделировании нейтронно-физических процессов или при обработке экспериментальных данных, может возникнуть пожар. Согласно [38], в зависимости от

характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий. Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т.д., необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [37]:

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение персонала правилам противопожарной безопасности;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования;
- правильное размещение оборудования, своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо: сообщить руководству (дежурному), позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112, принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

В данном разделе представлен анализ возможных социальных, общественных, экологических негативных эффектов, вызванных разработкой, эксплуатацией и утилизацией исследуемого объекта. В частности, выполнены следующие задачи:

- проанализированы вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть на этапах разработки и эксплуатации объекта исследования;
- обоснованы мероприятия по снижению уровня воздействия выявленных вредных и опасных факторов;
- проанализированы мероприятия по обеспечению экологической безопасности;
- рассмотрены вероятные ЧС, которые могут возникнуть в результате эксплуатации объекта и на рабочем месте при проведении исследования, а также предложены меры по предотвращению ЧС.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью настоящей работы является разработка нейтронного метода определения влажности почвы.

Выполнение грамотной научно-исследовательской работы требует наличия экономической оценки всех её элементов: как объекта исследования, так и методов, которые для этого используются. Таким образом, целью данного раздела является комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов разработки исследуемого метода. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести SWOT-анализ;
- провести планирование научно-исследовательской работы;
- произвести расчёт бюджета научно-исследовательской работы;
- определить ресурсную эффективность исследования.

### **4.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные сведения о выполнении данной работы представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Постановка задачи	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор структурной схемы установки	НР, И	НР – 100% И – 70%
Расчет переноса нейтронов	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Как видно из представленной выше таблицы, роль научного руководителя в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, когда как исследователь является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

#### 4.2 Продолжительность этапов работ

Продолжительность этапов работ могут быть рассчитаны следующими двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый метод подразумевает наличие и использование соответствующей нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой

при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый
- экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ  $t_{ож}$  может применяться одна из двух формул:

$$t_{ож} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (28)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6}, \quad (29)$$

где  $t_{\min}$  – минимальная продолжительность работы, сут.;

$t_{\max}$  – максимальная продолжительность работы, сут.;

$t_{\text{prob}}$  – наиболее вероятная продолжительность работы, сут.

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет все

Для выполнения перечисленных в таблице 12 работ требуются специалисты: исследователь (в его роли действует исполнитель ВКР) и научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (30)$$

где  $K_{\text{вн}}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, для исследователя и научного руководителя  $K_{\text{д}} = 1,15$ .

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (31)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – календарные дни;

$T_{\text{вд}}$  – выходные дни;

$T_{\text{пд}}$  – праздничные дни. При учёте, что  $T_{\text{кал}} = 365$ ,  $T_{\text{вд}} = 52$ ,  $T_{\text{пд}} = 10$ .

В приложении Б приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 28. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента  $K_{\text{д}} = 1,15$ . Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение  $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{д}}$ . Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на 1,212. Итог по столбцу 5 даёт общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов,



позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в приложении Б.

#### **4.3 Потенциальные потребители результатов исследования**

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую эффективность и конкурентоспособность рассматриваемого в данной научно-исследовательской методе.

Объектом исследования настоящей работы является установка по определению влажности почвы. Соответственно, область применения исследуемой системы ограничивается потребностями следующих отраслей:

- сельскохозяйственная промышленность;
- лесная промышленность;
- строительством крупных объектов (в том числе крупным инженерным сооружениям);
- геофизическая разведка;
- горнодобывающая промышленность;

т.е. те отрасли, где знание состава грунта, равно как и знание о влагосодержании грунта является необходимым для возделывания почв, расчету прочностных характеристик основания для фундамента и содержания полезных ископаемых в недрах.

Помимо нейтронного метода определения влажности почвы, существует также диэлектрический, гравиметрический, тензометрический методы, которые в настоящее время актуальны и широко используются. В связи с вышенаписанным, рынок услуг по определению влагосодержания грунта можно

сегментировать по множеству критериев, основными из которых являются область применения и методы определения (см. рисунок 24).

		Область применения		
		Сельское хозяйство	Строительство	Горнодобывающая промышленность
Метод	нейтронный			
	диэлектрический			
	гравиметрический			
	тензометрический			

Рисунок 24 – Карта сегментирования рынка услуг по определению влагосодержания грунта

Таким образом, согласно рисунку 24, можно сказать, что нейтронный метод занимает значимую часть в рынке услуг по определению влагосодержания грунтов, и более того, среди наиболее применимых методов единственный способен обеспечивать геофизическую разведку местности (каротаж и т.д.).

#### 4.4 Анализ конкурентных технических решений

Конкурентами исследуемого в настоящей работе нейтронного метода по определению влагосодержания грунта являются уже обозначенные диэлектрический, гравиметрический и тензометрический методы.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (32)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. В таблице 13 представлена оценочная карта конкурентоспособности различных характеристик, упомянутых методов, где  $K_1$  – нейтронный метод,  $K_2$  – диэлектрический метод,  $K_3$  – тензометрический метод.

Таблица 13 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	3	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки эффективности</b>							
1. Мобильность	0,1	2	3	5	0,2	0,3	0,5
2. Размеры	0,1	2	3	5	0,2	0,3	0,5
3. Точность	0,2	5	4	2	1	0,8	0,4
4. Безопасность	0,1	1	3	5	0,1	0,3	0,5
5. Охватываемая область	0,15	5	3	2	0,75	0,45	0,3
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Стоимость	0,2	2	3	5	0,4	0,6	1
2. Срок эксплуатации	0,05	4	5	1	0,2	0,25	0,05
3. Область применения	0,15	5	4	2	0,75	0,6	0,3
<b>Итого</b>	1	21	27	24	3,6	3,6	3,55

Согласно результатам, представленным в таблице 13, исследуемый нейтронный метод не уступает в конкурентоспособности диэлектрическому методу, в тоже время превосходит тензометрический. Учитывая широкую распространенность и востребованность диэлектрического и тензометрического методов, можно сделать вывод о том, что исследуемый нейтронный метод является перспективным и конкурентоспособным.

#### 4.5 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ любого научно-исследовательского проекта. SWOT анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой установки. Сильными сторонами исследуемого метода можно назвать следующие особенности и свойства:

– точность определения влагосодержания;

- широкая область применения (в различных областях хозяйственной деятельности, таких как сельское хозяйство, лесное хозяйство, горнодобывающая промышленность, геофизическая разведка и т.д.);

- большая область охвата исследуемого грунта.

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию. Слабыми сторонами рассматриваемой установки можно назвать следующие свойства и особенности:

- высокая стоимость установки (по сравнению с конкурентными технологиями);

- большие размеры установки, следовательно, низкая мобильность, однако при использовании перевозочного транспорта ситуация улучшается;

- высокая радиационная опасность, вызванная использованием источника нейтронов.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта. К возможностям исследуемой установки можно отнести:

- возможность осуществлять измерение влагосодержания грунта;

- предоставление дополнительных рабочих мест.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды объекта, что может иметь разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 14 представлен матрица SWOT-анализ исследуемого метода.

Таблица 14 – Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны:</b> С1. Точность определения влагосодержания. С2. Широкая область применения (в различных отраслях хозяйственной деятельности). С3. Большая область охвата исследуемого грунта.	<b>Слабые стороны:</b> Сл1. Высокая стоимость установки. Сл2. Большие размеры установки, следовательно, низкая мобильность, однако при использовании перевозочного транспорта ситуация улучшается. Сл3. Высокая радиационная опасность, вызванная использованием источника нейтронов.
<b>Возможности:</b> 1. Возможность измерения влагосодержания грунта. 2. Предоставление дополнительных рабочих мест.	1. Конструкционная особенность установки позволяет осуществлять приповерхностное измерение влагосодержания грунта (без погружения источника). 2. Возможность использование установки в скалистой местности. 3. Возможность осуществления мониторинга состояния грунта, как во времени, так и в пространстве. 4. Разрастание лаборатории и увеличение оборудования приведет к увеличению персонала.	1. Приповерхностная работа с источником нейтронов, в отличие от погружного способа (каротажа и т.д.) влечет за собой повышенный радиационный фон в области исследования, соответственно необходимы дополнительные меры защиты.
<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Снижение государственного финансирования научного исследования.	1. Перспективные возможности рассматриваемой установки положительно влияют на её привлекательность и могут привлечь новых инвесторов к окончательной реализации проекта с решением многих производственных задач.	1. Разрабатываемый метод является экспериментальным, в то время как на рынке существуют эффективные технологии в достаточной мере удовлетворяющие потребителей.

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. Реакторная установка РИТМ-200 в связи с отличными характеристиками имеет достаточно устойчивые перспективы для использования в качестве источника электроэнергии. Однако для выхода на

рынок требуется крупный первоначальный заказ (десятки блоков), что позволит снизить среднюю расчетную себестоимость производства электроэнергии на реакторных установках малой мощности.

#### 4.6 Расчет накопления готовности работы

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего ( $i$ -го) этапа.

Степень готовности определяется следующей формулой:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}, \quad (33)$$

где  $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоёмкость проекта;

$TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоёмкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;

$TP_i^H$  – накопленная трудоёмкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;

$TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоёмкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе,

здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя.

Применительно к таблице, представленной в приложении А, величины  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) находятся в столбцах (6,  $j = 1$ ) и (7,  $j = 2$ ). Величина  $TP_{\text{общ}}$  равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета  $TP_i(\%)$  и  $CG_i(\%)$  на основе этих данных содержится в таблице 15.

Таблица 15 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i, \%$	$CG_i, \%$
Постановка задачи	3,68	3,68
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	6,93	10,61
Подбор и изучение материалов по тематике	11,61	22,22

Этап	ТР <sub>i</sub> , %	СГ <sub>i</sub> , %
Разработка календарного плана	4,04	26,26
Обсуждение литературы	7,56	33,82
Выбор структурной схемы установки	21,43	55,25
Расчет переноса нейтронов	19,96	75,21
Оформление расчетно-пояснительной записки	6,30	81,51
Оформление графического материала	12,61	94,12
Подведение итогов	5,88	100,00

Согласно таблице 4.4, наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах подбора и изучения материала по тематике, проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении, когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

#### **4.7 Расчет сметы на выполнение проекта**

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;

- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

#### 4.7.1 Расчет затрат на материалы

К статье расходов «материалы и покупные изделия» относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции). Приблизённо они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

ТЗР составляют 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны 1365 рублей.



#### 4.7.2 Расчет заработной платы

Заработная плата подразумевает суммарную заработную плату научного руководителя и исследователя (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}, \quad (34)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей недели.

Пример расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 17. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения А. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,3$ ;  $K_{\text{доп.зп}} = 1,2$ ;  $K_{\text{Р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{доп.зп}} \cdot K_{\text{Р}}. \quad (35)$$

Оклад научного руководителя установлен, согласно приказу ТПУ 16544 от 18.12.19, в 35120 руб. Оклад же исследователя установлен в размере минимального равного 12130 руб.

Таблица 17 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	K <sub>и</sub>	Фон з/п, руб.
НР	35120	1404,8	16	2,028	45582,95
И	12130	485,2	28		27551,59
Итого:					73134,55

#### 4.7.3 Расчет затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Таким образом, затраты на страховые взносы составят:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,302. \quad (36)$$

$$C_{\text{соц}} = 61270,01 \cdot 0,302 = 18503,54.$$

Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС).

#### 4.7.4 Расчет затрат на электроэнергию

Затраты на электроэнергию подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (37)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $C_{\text{э}} = 5,748$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения А для исполнителя ( $T_{\text{рд}}$ ) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (38)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , в настоящей работе  $K_t$  выбран равный 1.

В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{об}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (39)$$

Где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}} \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_{\text{С}} = 1$ .

Результаты расчёта затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	224	0,3	386,27
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			387,42

#### 4.7.5 Расчет амортизационных расходов

Расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (40)$$

где  $H_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2020 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне,  $F_d$  равен 2384 часам.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

$H_A$  определяется как величина обратная  $C_A$ , в данном случае это:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 224 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3758,39.$$

#### 4.7.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены. Их следует принимать равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1. \quad (41)$$

Прочие расходы настоящего проекта равны 6680,60 рублей.

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта (см. таблица 19).

Таблица 19 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма	
		руб.	%
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1365	1,28
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	73134,55	68,44
Страховые взносы	$C_{\text{СОЦ}}$	18503,54	17,32
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	387,42	0,36
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	3758,39	3,52
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	9714,89	9,09
Итого:		106863,79	100,00

Таким образом, затраты на разработку составили 106863,79 руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников проекта, когда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

#### **4.7.7 Расчет суммарной себестоимости разработки**

Ввиду отсутствия данных, прибыль  $G$  рассчитана как 20% от полной себестоимости проекта и соответственно равна 21372,758 рублей.

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2. \quad (42)$$

$$\text{НДС} = (106863,79 + 21372,758) \cdot 0,2 = 25647,31 \text{ руб.}$$

Цена разработки проекта равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}, \quad (43)$$

$$C_{\text{НИР}} = 106863,79 + 21372,758 + 25647,31 = 153883,86 \text{ руб.}$$

Ввиду того, что проект является уникальным, аналогичных проектов не существует, то оценку экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта невозможно провести.

Для любого научно-исследовательского проекта существует потребность в качественной экономической оценке всех его элементов. Определение трудовых и финансовых затрат, перспективности осуществляемого исследования лежат в основе формирования комплексной и целостной работы. Кроме того, выполнены следующие задачи:

1. Определение сильных и слабых сторон рассматриваемого объекта (SWOT-анализ) показало, что предлагаемая установка имеет много перспектив для реализации. Однако подобная установка является уникальной, не предназначенной для серийного выпуска, в связи с чем себестоимость продукта невозможно снизить с помощью эффекта масштаба, что усложняет выход

установки на рынок. Кроме того, в настоящий момент на рынке имеются зарекомендованные технологии и внедрение новых технологий на рынок является затруднительным. Однако для выхода на рынок требуется крупный первоначальный заказ (десятки блоков), что позволит снизить среднюю расчетную себестоимость производства электроэнергии.

2. Произведено планирование научно-исследовательской работы, при этом установлено, что роль научного руководителя в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, когда как исследователь является исполнительным звеном — он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели. Наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах подбора и изучения материала по тематике, проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении, когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

3. Бюджет научно-технического исследования составил 153883,86 руб. Бюджет НТИ состоит из материальных затрат (1365,00 руб.), амортизационных отчислений (3758,39 руб.), затрат на оплаты труда (73134,55 руб.), оплату страховых взносов (18503,54 руб.) и прочих расходов (9714,89 руб.).

4. Оценка экономической эффективности не проведена по причине закрытости или отсутствия данных по исследуемому методу.

## Заключение

В настоящей работе продемонстрировать возможность предложенного ранее метода определения влажности почвы с учетом реальных размеров коллиматора и геометрии источника нейтронов.

Методом комбинированного моделирования Sources4C-PHITS исследован AmBe радиоизотопный источник нейтронов, необходимый для проведения основного исследования, установлено, что наиболее приемлемым для расчетов является AmBe источник активностью 370 ГБк, результаты моделирования хорошо согласуются с бенчмарком.

Создана полномасштабная модель установки с учетом всех технических особенностей, обозначенных авторами оригинальной статьи. На основе реальной модели создана расчетная модель, кроме того, создана расчетная модель с точечным источником нейтронов, аналогичная модели из оригинальной работы. Сравнительный анализ спектров нейтронов, падающих на эффективную поверхность почвы, и углового распределения рассеянных нейтронов (при различной влажности почвы от 0% до 30%) от точечного источника и источника реальных размеров показал, что модель с точечным источником применима для предварительных оценок, таким образом осуществлено техническое обоснование метода определения влажности почвы с помощью углового распределения нейтронов.

### Список используемых источников

- 1 Hammersley J. Monte carlo methods. – Springer Science & Business Media, 2013.
- 2 Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб. Пособие для вузов/ Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. -3-е изд., перерад. и доп. – Екб: Издательство ЮЛАНД, 2016 год. – 512
- 3 Meigh A. C., Skipp B. O. Gamma-ray and neutron methods of measuring soil density and moisture //Geotechnique. – 1960. – Т. 10. – №. 3. – С. 110-126.
- 4 Balaghi S. et al. A neutron scattering soil moisture measurement system with a linear response //Applied Radiation and Isotopes. – 2018. – Т. 142. – С. 167-172.
- 5 Ghaemifard M. et al. Angular distribution of scattered neutrons as a tool for soil moisture measurement: A feasibility study //Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – С. 109131.
- 6 Vega-Carrillo H. R. et al. Neutron and gamma-ray spectra of  $^{239}\text{PuBe}$  and  $^{241}\text{AmBe}$  //Applied Radiation and Isotopes. – 2002. – Т. 57. – №. 2. – С. 167-170.
- 7 Bedenko S. V. et al. Nedis-Serpent simulation of a neutron source assembly with complex internal heterogeneous structure //Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – С. 109066.
- 8 C.M. Lederer, V.S. Shirley etc., Table of Isotopes, 7-е изд. – Нью-Йорк: Издательство John Wiley&Sons, 1978. – С.592
- 9 Perry R. T., Wilson W. B. Neutron production from ( $\alpha$ ,n) reactions and spontaneous fission in  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ , and (U, Pu) $\text{O}_2$  fuels. – Los Alamos National Lab., 1981. – №. LA-8869-MS.
- 10 Shibata K. et al. JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering //Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – Т. 48. – №. 1. – С. 1-30.
- 11 Marsh J. W., Thomas D. J., Burke M. High resolution measurements of neutron energy spectra from AmBe and AmB neutron sources //Nuclear Instruments



and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1995. – T. 366. – №. 2-3. – C. 340-348.

12 Ghal-Eh N., Rahmani F., Bedenko S. V. Conceptual design for a new heterogeneous  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  neutron source assembly using SOURCES4C-MCNPX hybrid simulations //Applied Radiation and Isotopes. – 2019. – T. 153. – C. 108811

13 Vega-Carrillo H. R., Martinez-Ovalle S. A. Few groups neutron spectra, and dosimetric features, of isotopic neutron sources //Applied Radiation and Isotopes. – 2016. – T. 117. – C. 42-50.

14 Zwan L. V. Calculated neutron spectra from  $^9\text{Be}$  ( $\alpha$ , n) sources //Canadian Journal of Physics. – 1968. – T. 46. – №. 13. – C. 1527-1536.

15 Tsujimura N., Yoshida T. Calculation of anisotropy factors for  $^{241}\text{Am}$ -Be neutron sources //Radioisotopes (Tokyo). – 2007. – T. 56. – №. 9. – C. 497-508.

16 Griesheimer D. P. et al. In-line ( $\alpha$ , n) source sampling methodology for monte carlo radiation transport simulations //Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – T. 49. – №. 6. – C. 1199-1210.

17 Liu Z. et al. The 4.438 MeV gamma to neutron ratio for the Am–Be neutron source //Applied Radiation and Isotopes. – 2007. – T. 65. – №. 12. – C. 1318-1321.

18 Wilson W. B. et al. Sources: a code for calculating ( $\alpha$ , n), spontaneous fission, and delayed neutron sources and spectra //Radiation protection dosimetry. – 2005. – T. 115. – №. 1-4. – C. 117-121.

19 Sato T. et al. Recent improvements of particle and heavy ion transport code system: PHITS //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – T. 153. – C. 06008.

20 Bedenko S. V. et al. A fuel for generation IV nuclear energy system: Isotopic composition and radiation characteristics //Applied Radiation and Isotopes. – 2019. – T. 147. – C. 189-196.

21 Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – T. 268. – №. 11-12. – C. 1818-1823.

- 22 Thwaites D. I. Bragg's rule of stopping power additivity: A compilation and summary of results // Radiation Research. – 1983. – Т. 95. – №. 3. – С. 495-518
- 23 International Organization for Standardization. Reference neutron radiations—Part 2: calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field //ISO 8529-2. – 2000.
- 24 Crawford R. K. Position-sensitive detection of slow neutrons: Survey of fundamental principles //Neutrons, X Rays, and Gamma Rays: Imaging Detectors, Material Characterization Techniques, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 1993. – Т. 1737. – С. 210-223.
- 25 McConn R. J. et al. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. – Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2011. – №. PNNL-15870 Rev. 1.
- 26 Ratnayaka D. D. et al. Water supply. – Butterworth-Heinemann, 2009.
- 27 СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009
- 28 Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. №40).
- 29 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
- 30 СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
- 31 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
- 32 РБ-042-07 Руководство по безопасности «Методика категорирования закрытых радионуклидных источников по потенциальной радиационной опасности»

33 СанПиН 2.6.1.1202-03 Гигиенические требования к использованию закрытых радионуклидных источников ионизирующего излучения при геофизических работах на буровых скважинах

34 ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

35 Отчет по экологической безопасности //ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» – 2016 г. – 48 с.

36 ГОСТ Р 22.11.01-2014 «БЧС. БЖД населения на радиоактивно загрязненных территориях. Основные положения»

37 ГОСТ Р 22.11.01-2014 «БЧС. БЖД населения на радиоактивно загрязненных территориях. Общие требования к системе мониторинга радиационной обстановки»

38 ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования

## Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1 – Выходные данные PHITS и Sources4C

$E_i$ , МэВ	$E_{i+1}$ , МэВ	$Q_{PHITS}$ , $10^5$ н/с	$Q_{S4C}$ , $10^5$ н/с
0,00	0,11	3,82	2,17
0,11	0,33	9,39	3,05
0,33	0,54	9,17	3,72
0,54	0,75	8,05	4,74
0,75	0,97	7,25	4,31
0,97	1,18	5,90	3,72
1,18	1,40	5,67	3,34
1,40	1,61	5,01	2,78
1,61	1,82	5,05	2,64
1,82	2,04	6,22	3,97
2,04	2,25	6,04	4,49
2,25	2,47	6,06	4,58
2,47	2,68	5,98	5,10
2,68	2,90	6,82	7,03
2,90	3,11	8,32	9,74
3,11	3,32	8,39	9,85
3,32	3,54	7,61	8,28
3,54	3,75	6,75	7,59
3,75	3,97	6,79	7,30
3,97	4,18	6,44	7,19
4,18	4,39	6,36	7,16
4,39	4,61	6,76	7,35
4,61	4,82	6,82	7,85
4,82	5,04	7,58	8,51
5,04	5,25	6,79	8,12
5,25	5,47	6,30	7,19
5,47	5,68	4,97	5,96
5,68	5,89	4,15	4,96
5,89	6,11	2,98	3,18

Продолжение таблицы А.1

6,11	6,32	3,20	3,60
6,32	6,54	4,54	5,20
6,54	6,75	3,92	4,69
6,75	6,96	3,18	3,70
6,96	7,18	3,31	3,62
7,18	7,39	3,60	4,17
7,39	7,61	4,37	4,94
7,61	7,82	4,41	5,34
7,82	8,03	4,27	5,26
8,03	8,25	3,81	4,56
8,25	8,46	2,57	3,20
8,46	8,68	1,88	2,22
8,68	8,89	1,22	1,47
8,89	9,11	0,98	1,06
9,11	9,32	1,02	1,16
9,32	9,53	1,41	1,67
9,53	9,75	1,65	1,91
9,75	9,96	1,45	1,80
9,96	10,20	1,33	1,47
10,20	10,40	0,71	0,94
10,40	10,60	0,35	0,47
10,60	10,80	0,15	0,21
10,80	11,00	0,03	0,04

Таблица А.2 – Сравнение расчетного и экспериментального спектров AmBe источника

$E_i$ , МэВ	$E_{i+1}$ , МэВ	$I_{PHITS}$ , %	$I_{ISO}$ , %
0,00	0,11	1,59	1,44
0,11	0,33	3,90	3,34
0,33	0,54	3,81	3,14
0,54	0,75	3,34	2,81
0,75	0,97	3,01	2,50
0,97	1,18	2,45	2,14
1,18	1,40	2,35	1,98
1,40	1,61	2,08	1,75
1,61	1,82	2,10	1,92
1,82	2,04	2,58	2,23
2,04	2,25	2,51	2,15
2,25	2,47	2,52	2,25
2,47	2,68	2,48	2,28
2,68	2,90	2,83	2,95
2,90	3,11	3,45	3,56
3,11	3,32	3,48	3,69
3,32	3,54	3,16	3,46
3,54	3,75	2,80	3,07
3,75	3,97	2,82	3,00
3,97	4,18	2,67	2,69
4,18	4,39	2,64	2,86
4,39	4,61	2,81	3,18
4,61	4,82	2,83	3,07
4,82	5,04	3,15	3,33
5,04	5,25	2,82	3,04
5,25	5,47	2,61	2,74
5,47	5,68	2,06	2,33
5,68	5,89	1,72	2,06
5,89	6,11	1,24	1,82
6,11	6,32	1,33	1,77

Продолжение таблицы А.2

6,32	6,54	1,89	2,04
6,54	6,75	1,63	1,83
6,75	6,96	1,32	1,63
6,96	7,18	1,37	1,68
7,18	7,39	1,50	1,68
7,39	7,61	1,81	1,88
7,61	7,82	1,83	1,84
7,82	8,03	1,77	1,69
8,03	8,25	1,58	1,44
8,25	8,46	1,07	0,97
8,46	8,68	0,78	0,65
8,68	8,89	0,51	0,43
8,89	9,11	0,41	0,37
9,11	9,32	0,43	0,38
9,32	9,53	0,58	0,51
9,53	9,75	0,68	0,63
9,75	9,96	0,60	0,55
9,96	10,20	0,55	0,47
10,20	10,40	0,29	0,37
10,40	10,60	0,15	0,28
10,60	10,80	0,06	0,15
10,80	11,00	0,01	0,36

Таблица А.3 – Ток нейтронов через эффективную поверхность почвы

$E_i$ , МэВ	$E_{i+1}$ , МэВ	$I_{\text{точечн}}, \%$	$I_{15}, \%$	$I_{20}, \%$	$I_{25}, \%$	$I_{30}, \%$
0,00	0,11	15,836	20,342	19,978	19,929	20,158
0,11	0,33	6,140	7,243	7,223	7,266	7,303
0,33	0,54	4,584	5,225	5,153	5,148	5,122
0,54	0,75	3,668	4,015	4,049	4,061	4,081
0,75	0,97	3,443	3,636	3,627	3,653	3,676
0,97	1,18	2,614	2,901	2,878	2,878	2,917
1,18	1,40	2,461	2,795	2,796	2,843	2,813
1,40	1,61	2,043	2,547	2,542	2,539	2,544
1,61	1,82	1,964	2,391	2,408	2,369	2,343
1,82	2,04	2,287	2,504	2,478	2,473	2,477
2,04	2,25	2,061	2,246	2,278	2,273	2,261
2,25	2,47	2,149	2,223	2,246	2,270	2,269
2,47	2,68	2,008	1,969	2,007	2,038	2,035
2,68	2,90	2,321	2,034	2,056	2,047	2,024
2,90	3,11	2,629	2,282	2,286	2,258	2,223
3,11	3,32	2,608	2,158	2,181	2,194	2,185
3,32	3,54	2,459	2,074	2,102	2,092	2,063
3,54	3,75	2,100	1,791	1,792	1,788	1,762
3,75	3,97	2,181	1,829	1,832	1,809	1,787
3,97	4,18	1,987	1,666	1,694	1,685	1,692
4,18	4,39	1,935	1,723	1,734	1,721	1,676
4,39	4,61	2,158	1,727	1,745	1,752	1,750
4,61	4,82	2,042	1,720	1,732	1,742	1,716
4,82	5,04	2,393	1,859	1,870	1,843	1,821
5,04	5,25	2,009	1,595	1,619	1,619	1,612
5,25	5,47	1,941	1,516	1,535	1,543	1,552
5,47	5,68	1,486	1,168	1,168	1,190	1,185
5,68	5,89	1,230	1,040	1,036	1,037	1,037
5,89	6,11	0,943	0,819	0,836	0,824	0,822
6,11	6,32	0,959	0,837	0,855	0,851	0,854



Продолжение таблицы А.3

6,32	6,54	1,439	1,119	1,109	1,112	1,107
6,54	6,75	1,193	0,922	0,926	0,935	0,935
6,75	6,96	0,956	0,822	0,825	0,826	0,829
6,96	7,18	1,050	0,801	0,839	0,844	0,829
7,18	7,39	1,071	0,846	0,867	0,873	0,869
7,39	7,61	1,345	1,014	1,024	1,018	1,022
7,61	7,82	1,330	1,046	1,057	1,048	1,038
7,82	8,03	1,241	1,050	1,072	1,075	1,079
8,03	8,25	1,228	0,827	0,858	0,853	0,859
8,25	8,46	0,756	0,574	0,574	0,576	0,584
8,46	8,68	0,566	0,425	0,441	0,448	0,456
8,68	8,89	0,372	0,298	0,302	0,302	0,296
8,89	9,11	0,308	0,275	0,274	0,275	0,273
9,11	9,32	0,331	0,309	0,297	0,288	0,286
9,32	9,53	0,415	0,369	0,384	0,389	0,378
9,53	9,75	0,527	0,375	0,379	0,379	0,369
9,75	9,96	0,434	0,348	0,356	0,346	0,347
9,96	10,20	0,462	0,341	0,334	0,330	0,337
10,20	10,40	0,201	0,201	0,190	0,193	0,196
10,40	10,60	0,097	0,113	0,108	0,103	0,103
10,60	10,80	0,034	0,038	0,037	0,041	0,039
10,80	11,00	0,006	0,012	0,011	0,012	0,011

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	1	2	1,40	1,61	0,00	1,95	0,00
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,33
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	4	3,40	1,17	3,91	1,42	4,74
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,20
Обсуждение литературы	НР, И	2	3	2,40	0,55	2,76	0,67	3,35
Выбор структурной схемы установки	НР, И	3	5	3,80	4,37	3,06	5,30	3,71
Расчет переноса нейтронов	И	4	6	4,80	0,00	5,52	0,00	6,69
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	2	3	2,40	0,00	2,76	0,00	3,35
Оформление графического материала	И	2	3	2,40	0,00	2,76	0,00	3,35
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,17	1,95
Итого:				25,80	13,04	22,82	15,81	27,65

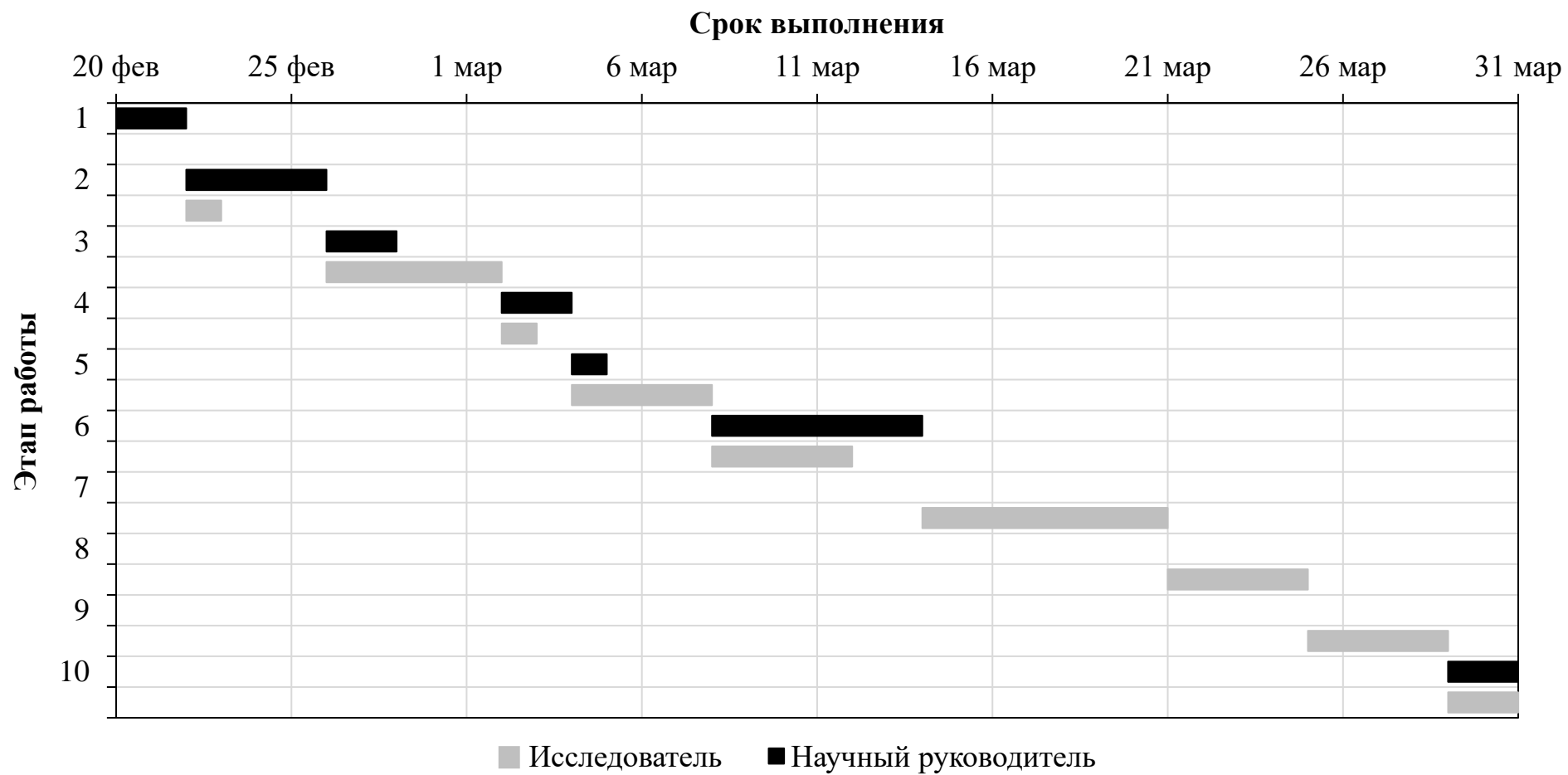


Рисунок Б.1 – Диаграмма Гантта